



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PALIVOVÝ CYKLUS JADERNÉ ELEKTRÁRNY DUKOVANY

NUCLEAR FUEL CYCLE OF DUKOVANY NPP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL DUDÁŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL KATOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Michal Dudáš

ID: 125407

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Palivový cyklus jaderné elektrárny Dukovany

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Definujte pojem vnějšího a vnitřního palivového cyklu.
2. Popište vnitřní palivové cykly jaderných elektráren současnosti, zaměřte se na jaderné elektrárny s reaktory středních výkonů.
3. Popište typy jaderných paliv používaných na EDU od počátku provozu.
4. Popište vývoj vnitřního palivového cyklu EDU od počátku provozu do současnosti.
5. Proveďte jednoduchou simulaci možných překládek jaderného paliva na EDU v případě čtyř, pěti a šestiletého palivového cyklu.
6. Rozeberte a porovnejte tyto cykly z hlediska využití paliva, ekonomie, skladování a organizace provozu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

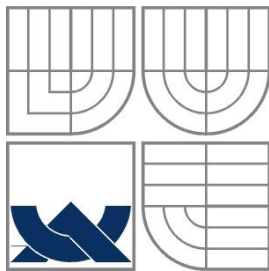
Bibliografická citácia práce:

DUDÁŠ, M. *Palivový cyklus jaderné elektrárny Dukovany*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D..

Rád by som sa poďakoval vedúcemu bakalárskej práce Ing. Karlovi Katovskému Ph.D. za podporu pri vytváraní tejto práce. V neposlednej rade ďakujem svojej rodine za podporu pri štúdiu.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalárska práca

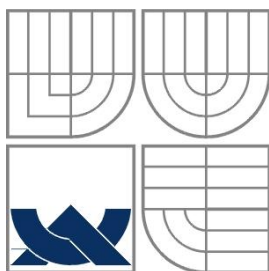
Palivový cyklus jaderné elektrárny Dukovany

Michal Dudáš

vedúci: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

Nuclear fuel cycle of Dukovany NPP

by

Michal Dudáš

Supervisor: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Brno University of Technology, 2012

Brno

ABSTRAKT

Cieľom tejto bakalárskej práce je zoznámiť sa s problematikou vnútorného a vonkajšieho palivového cyklu EDU so zameraním na jeho strednú časť. Popisuje metódy zavážania *in-out* a *out-in*, rozdiely medzi kontinuálnym a kampaňovitým palivovým cyklom. Sú tu stručne popísané jednotlivé typy palív používaných na EDU od začiatku prevádzky až do súčasnosti. Práca sa ďalej zaoberá popisom vonkajšieho palivového cyklu. V prednej časti palivového cyklu sa bližšie popisuje ťažba, úprava a obohatovanie uránu, rôzne separačné metódy. Zadná časť sa zaoberá hlavne spôsobmi skladovania vyhoreného paliva, popisuje mokré i suché sklady a definitívne uloženie vyhoreného paliva. Je tu tiež uvedený stručný prehľad najznámejších typov reaktorov s krátkym popisom ich palivových cyklov. V práci sú ďalej popísané rôzne dlhé palivové cykly z hľadiska typov používaných palív a použitých metódach zavážania palivových súborov. Je tu tiež návrh možných termínov pravidelných odstávok pre rôzne dlhé kampane. Práca obsahuje ekonomické zhodnotenie a porovnanie jednotlivých palivových cyklov, ktoré vychádza zo zjednodušených podmienok, výhody a nevýhody jednotlivých cyklov z hľadiska organizácie prevádzky a skladovania paliva.

KEÚČOVÉ SLOVÁ: EDU; VVER; palivový súbor; palivový cyklus; obohatenie; urán

ABSTRACT

The goal of this bachelor's thesis is to introduce the nuclear fuel cycle of nuclear power plant Dukovany focusing on its middle part. It describes the methods of loading fuel assemblies *in-out* and *out-in*, the differences between continual (*on-load* reactors) and campaign kind of fuel cycle. There are briefly described individual types of fuel used on nuclear power plant Dukovany from the start to recent days. It is further followed by the external fuel cycle. The *front end* describes more about mining, enrichment and fabrication. There are also few different separation methods of uranium described. The *back end* deals with different ways of spent fuel storage, spent fuel pools, and dry cask storage as well as ultimate disposal. The paper also contains brief overview among the most known nuclear reactors with the short descriptions of its own nuclear fuel cycles. It is further followed by description of fuel cycles with different length, focusing on different types of fuel and different loading methods. There is also a possible concept of outages for nuclear power plant Dukovany considering few different long lasting campaigns. The paper contains economic assessment considering the simplified conditions. It also deals with pros and cons of individual cycles focusing on organization operating and spent fuel storage.

KEY WORDS: NPP Dukovany; VVER; fuel assembly; fuel cycle; enrichment; uranium

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV	10
ZOZNAM TABULIEK.....	11
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	12
1 ÚVOD	14
2 DEFINÍCIA PALIVOVÉHO CYKLU	15
2.1 DEFINÍCIA STREDNEJ ČASTI PALIVOVÉHO CYKLU	16
2.2 TYPY STREDNÝCH ČASTÍ PALIVOVÉHO CYKLU	16
2.2.1 KAMPAŇOVITÝ A KONTINUÁLNY SPÔSOB	16
2.2.2 METÓDY IN-OUT A OUT-IN.....	17
2.3 VÝROBCA JADROVÉHO PALIVA PRE EDU	17
2.3.1 TYPY PALÍV VYRÁBANÉ KORPORÁCIOU TVEL.....	17
2.4 KONŠTRUKCIA PALIVA VVER 440	18
2.4.1 PALIVOVÝ PRÚTIK.....	18
2.4.2 PALIVOVÝ PRACOVNÝ SÚBOR.....	18
2.4.3 REGULAČNÝ SÚBOR	19
2.5 PREHEAD POUŽÍVANÝCH PALÍV V EDU	20
2.6 PRECHOD K 5-ROČNÉMU PALIVOVÉMU CYKLU	21
2.7 PALIVÁ S VYHORIEVAJÚCIMI ABSORBÁTORMI	22
3 VONKAJŠÍ PALIVOVÝ CYKLUS	24
3.1 PREDNÁ ČASŤ PALIVOVÉHO CYKLU.....	24
3.1.1 ŤAŽBA A ÚPRAVA URÁNU	24
3.1.2 SPRACOVANIE RUDY	25
3.1.3 OBOHAŤOVANIE URÁNU	25
3.2 ZADNÁ ČASŤ PALIVOVÉHO CYKLU.....	27
3.2.1 DOČASNÉ SKLADOVANIE VYHORENÉHO PALIVA	27
3.2.2 PREPRACOVANIE VYHORENÉHO PALIVA.....	30
3.2.3 DEFINITÍVNE ULOŽENIE JADROVÉHO PALIVA – HLBINNÉ ÚLOŽISKO	32
3.2.4 USKLADŇOVANIE PALIVA V SÍRE.....	33
4 INÉ TYPY REAKTOROV	34
4.1 REAKTORY PWR	34
4.1.1 VÝROBA ELEKTRINY V REAKTOROCH PWR	34
4.2 REAKTORY BWR	35
4.2.1 VÝROBA ELEKTRINY V REAKTOROCH BWR	35
4.3 REAKTORY AGR.....	36
4.3.1 VÝROBA ELEKTRINY V REAKTOROCH AGR	36
4.4 REAKTORY CANDU	37
4.4.1 VÝROBA ELEKTRINY V REAKTOROCH CANDU	37
4.5 REAKTORY FBR.....	37
4.5.1 VÝROBA ELEKTRINY V REAKTOROCH FBR.....	38

5 TYPY PREKLÁDOK PALIVA V RÔZNE DLHÝCH PALIVOVÝCH CYKLOCH EDU	39
5.1 TOPOLOGIA ŠESTINOVEJ SYMETRIE	39
5.1.1 3-ROČNÝ PALIVOVÝ CYKLUS	40
5.1.2 4-ROČNÝ PALIVOVÝ CYKLUS	41
5.1.3 5-ROČNÝ PALIVOVÝ CYKLUS	42
5.1.4 6 ROČNÝ PALIVOVÝ CYKLUS.....	44
5.1.5 ŠPECIÁLNE PALIVOVÉ CYKLY	44
5.1.6 15 MESAČNÉ KAMPANE	45
5.2 NÁVRH MOŽNÝCH PREKLÁDOK PALIVA NA EDU PRI 12, 15 A 18 MESAČNÝCH KAMPANIACH...	46
5.2.1 12 MESAČNÉ KAMPANE – 5 ROČNÝ PALIVOVÝ CYKLUS.....	46
5.2.2 15 MESAČNÉ KAMPANE – 5-ROČNÝ PALIVOVÝ CYKLUS	46
5.2.3 18 MESAČNÉ KAMPANE – 4,5-ROČNÝ CYKLUS.....	47
6 CELKOVÉ ZHODNOTENIE VYUŽITEĽNOSTI PALIVA	48
6.1 EKONOMICKÉ VYUŽITIE PALIVA.....	48
6.1.1 TROJROČNÝ PALIVOVÝ CYKLUS	48
6.1.2 ŠTVOR-ROČNÝ PALIVOVÝ CYKLUS	50
6.1.3 PÄŤ-ROČNÝ PALIVOVÝ CYKLUS.....	51
6.1.4 ZHODNOTENIE JEDNOTLIVÝCH PALIVOVÝCH CYKLOV	52
7 ZÁVER.....	53
POUŽITÁ LITERATÚRA	55

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 2-1: Palivový cyklus, prevzaté z [19].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-2: Výroba jadrového paliva – Elektrostal, prevzaté z [17]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-3: Konštrukcia palivového prútiku, prevzaté z [4]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-4: Konštrukcia palivového pracovného súboru, prevzaté z [4].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-5: Konštrukcia regulačného súboru, prevzaté z [4]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2-6: Typy používaných, prevzaté z [28]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-7: Pokročilé palivá typu Gd-2+ a Gd-2M, prevzaté z [28]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 2-8: Vývoj palivových vsádzok, prevzaté z [28].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-1: Uránová ruda, prevzaté z [20]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-2: Vydolovaná baňa uránovej rudy a jej zásah na životné prostredie, prevzaté z [13]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-3: Dobývanie uránovej rudy v bani, prevzaté z [20]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-4: Výroba „žltého koláča“, prevzaté z [23]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-5: Bazén - sklad vyhoreného jadrového paliva, prevzaté z [7]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3-6: Medzisklad vyhoreného paliva v Dukovanoch, prevzaté z [15]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-7: Kontajner CASTOR 440/84, prevzaté z [18].....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-8: Model vitrifikačnej linky, prevzaté z [10]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-9: Uskladňovanie paliva v síre, prevzaté z [14]</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4-1: Schéma reaktoru PWR, prevzaté z [26]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-2: Schéma reaktoru BWR, prevzaté z [26]</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-3: Schéma reaktoru AGR, prevzaté z [26]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-4: Schéma reaktoru CANDU, prevzaté z [26]</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-5: Schéma reaktoru FBR, prevzaté z [26]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-1: Šestinová symetria aktívnej zóny a čísla jednotlivých pozícií, prevzaté z [4].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5-2: Rozmiestnenie kaziet v aktívnej zóne pre 3-ročný palivový cyklus, prevzaté z [28]</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 5-3: Rozmiestnenie kaziet v aktívnej zóne pre 4-ročný palivový cyklus, prevzaté z [28]</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 5-4: Rozmiestnenie kaziet v aktívnej zóne pre 5-ročný palivový cyklus, prevzaté z [28]</i>	<i>44</i>

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 3-1 Základné údaje a parametre kontajneru CASTOR 440/84, prevzaté z [6].....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 3-2 Svetová kapacita prepracovacích závodov, údaje prevzaté z [22]</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 5-1 Plánované odstávky pri 15 mesačných kampaniach na elektrárni Paks [16]</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5-2 Termíny odstávok na EDU pri 12 mesačných cykloch - momentálny stav.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5-3 Možné termíny odstávok na EDU pri 15 mesačných kampaniach</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5-4 Možné termíny odstávok na EDU pri 15 mesačných kampaniach - odstávky každé tri mesiace</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5-5 Možné termíny odstávok na EDU pre 18 mesačné kampane.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6-1 Porovnanie jednotlivých cyklov z hľadiska využitia paliva</i>	<i>52</i>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Značka	Veličina	Jednotka
A	nukleónové číslo	-
E_j	energia získaná štiepením jedného atómu ^{235}U	J
E_{jev}	energia získaná štiepením jedného atómu ^{235}U prepočítaná na eV	eV
E_{rr}	reálne dosiahnuteľná energia celej AZ	J
E_{rt}	teoreticky využiteľná energia v AZ (tepelná energia)	J
E_s	skutočne vyrobená elektrická energia	J
Gd	gadolínium	-
K_q	radiálny koeficient	-
La	Lantán	-
Mo	Molybdén	-
N_A	Avogadrova konštanta	-
N_p	počet pracovných kaziet	-
N_r	počet regulačných kaziet	-
N_w	počet prútikov	-
P_e	elektrický výkon elektrárne	W
P_t	tepelný výkon elektrárne	W
T_{ef}	doba efektívnych dní	s
T_m	teplota moderátora	°C
T_p	teplota paliva	°C
$X_{p\%}$	obohatenie palivových kaziet ^{235}U po skončení palivového cyklu	%
$X_{r\%}$	obohatenie regulačných kaziet ^{235}U po skončení palivového cyklu	%
c	rýchlosť svetla	m.s^{-1}
e	elementárny náboj	eV
e_{lkg}	merná energia získaná rozštiepením 1 kg ^{235}U	J.kg^{-1}
k_{ef}	koeficient násobenia	-
$k_{\%p}$	koeficient stredného obohatenia ^{235}U v pracovných kazetách	-
$k_{\%r}$	koeficient stredného obohatenia ^{235}U v regulačných kazetách	-
m_{Up}	hmotnosť uránu v pracovných kazetách	kg
m_{Ur}	hmotnosť uránu v regulačných kazetách	kg

Značka	Veličina	Jednotka
m_p	hmotnosť paliva pracovnej kazety v jednom prútku	kg
m_r	hmotnosť paliva regulačnej kazety v jednom prútku	kg
m_{235Up}	hmotnosť ^{235}U v pracovných kazetách	kg
m_{235Ur}	hmotnosť ^{235}U v regulačných kazetách	kg
u	atómová jednotka hmotnosti	kg
η_e	účinnosť elektrárne	%
ρ	reaktivita	-

Skratka	Vysvetlivka
BWR	varný reaktor
CANDU	Canadian Deuterium Uranium
EDU	jadrová elektráreň Dukovany
ETE	jadrová elektráreň Temelín
FBR	Fast Breeder Reactor – rýchlo množivý reaktor
PG	parogenerátor
PWR	tlako-vodný reaktor
RBMK	kanálový reaktor s veľkým výkonom
VVER	vodo-vodný energetický reaktor

1 ÚVOD

V súčasnej dobe, kedy pretrvávajú finančné krízy sa vyvíjajú na energetické spoločnosti značné tlaky z dôvodu zefektívnenia výroby energie. Tento fakt sa samozrejme nevyhol ani jadrovej energetike.

Keďže je v tejto, pre jadrovú energetiku, neistej dobe značne nevýhodné investovať peniaze do vývoja nových jadrových reaktorov, energetické spoločnosti sústreďujú finančné toky hlavne do vývoja stredných častí palivových cyklov už existujúcich elektrární, resp. ich inovácií. Jedná sa hlavne o predlžovanie stredných častí palivových cyklov, zvyšovanie stredného obohatenia paliva a jeho konštrukcie a v neposlednom rade presné plánovanie pravidelných odstávok a organizácia prevádzky.

Cieľom tejto práce je práve zoznámenie sa so strednou časťou palivového cyklu EDU. Vyššie uvedené procesy prebiehajú aj tu a v posledných rokoch sa vďaka nim podarilo dosiahnuť zvýšenie elektrického výkonu až na 113 %, pričom palivový cyklus sa predĺžil oproti projektovému o dva roky. Hlavne vďaka týmto krokom sa ušetrili nesmierne finančné prostriedky a energia z jadra je tak bezkonkurenčne najvýhodnejší spôsob, ako zabezpečiť energetické potreby ľudstva.

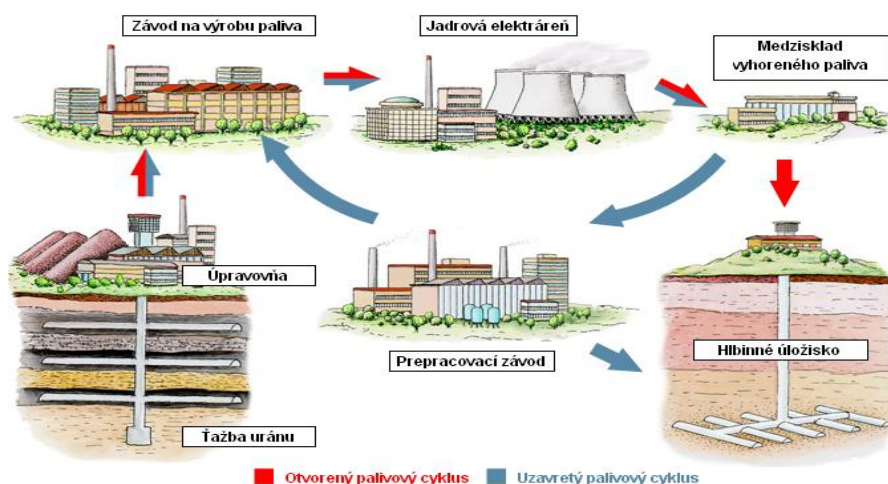
Táto bakalárska práca sa zaoberá strednou časťou palivového cyklu, metódami zavážania palivových vsádzok, konštrukciou jednotlivých súborov. V ďalšej časti je prebratý vonkajší palivový cyklus, rozčlenený na prednú a zadnú časť. Práca sa ďalej zaoberá popisom stredných častí palivových cyklov iných typov reaktorov menovite CANDU, FBR, AGR, RBMK. Predposledná časť sa bližšie zameriava na jednotlivé stredné časti palivových cyklov, ktoré prebehli na EDU a je tu tiež stručný prehľad špeciálnych palivových cyklov. Uvádza tiež vypracovaný návrh termínov pravidelných odstávok pre EDU pri 12, 15 a 18 mesačných kampaniach. V závere práce sa uvádza ekonomické zhodnotenie jednotlivých palivových cyklov a ich porovnanie z hľadiska organizácie prevádzky a skladovania vyhoreného paliva, ako aj využiteľnosť paliva.

2 DEFINÍCIA PALIVOVÉHO CYKLU

Jadrový palivový cyklus predstavuje proces ktorý sa deje s jadrovým palivom v slede na sebe nadväzujúcich fáz. Prvá fáza sa nazýva predná časť palivového cyklu (*front-end*), ktorá zahŕňa predovšetkým výrobu jadrového paliva (o problematike bližšie pojednáva kapitola 3). Druhá fáza sa nazýva stredná časť palivového cyklu a predstavuje hlavne obdobie, kedy je palivo zavezené v reaktore a prebieha jadrová reakcia. Poslednú fázu predstavuje zadná časť palivového cyklu, tzv. *back-end*. Úlohou tejto fázy je buď to zabezpečiť bezpečné uloženie vyhoreného jadrového paliva (otvorený palivový cyklus), alebo jeho následné prepracovanie pre použitie paliva v budúcnosti (uzavretý palivový cyklus).

Pretože prírodný surový urán, ktorý sa ťaží zo zemskej kôry je pre jadrové elektrárne prakticky nepoužiteľný, musí prejsť krokmi, ktoré umožnia jeho ďalšie použitie pre výrobu energie. Zahŕňujú hlavne jeho ťaženie, úpravu a obohacovanie končiac následnou výrobou paliva (pre reaktory VVER sa jedná o výrobu palivových tabliet naskladaných v palivovej kazete). Keď je palivo z výroby dovezené na elektrárňu do skladu čerstvého paliva, predná časť pomaly končí a pri odstávke reaktora a následnej výmene paliva sa začne stredná časť palivového cyklu. Obvykle trvá 4 - 6 rokov (mimo pravidelných odstávok pre výmenu paliva a technických prehliadok zariadení). Počas tohto obdobia dochádza v reaktore k jadrovej štiepnej reakcii, vďaka ktorej elektrárňu produkuje elektrickú energiu [3]. Keďže táto práca má tému úzko spätú so strednou časťou palivového cyklu, touto problematikou sa podrobne zaoberá nasledujúca časť.

Palivo je po vyvezení z aktívnej zóny veľmi horúce a vysoko rádioaktívne, preto sa zavádza do bazénov vyhoreného paliva. Tu sa začína zadná časť palivového cyklu. Palivo tu obvykle zotrva 7 rokov pod 8 metrov vysokým vodným stĺpcom, ktoré ho ochladzuje a zároveň zabezpečuje jeho tienenie proti škodlivému žiareniu. Ako už bolo spomenuté vyššie, niektoré krajiny sa zaoberajú prepracovávaním jadrového paliva (uzavretý palivový cyklus). To znamená, že v prepracovateľskej fabrike sa rádioaktívny odpad ďalej spracováva a separuje sa z neho nevyužitý ^{235}U a plutónium, z ktorých sa opäť vyrába čerstvé jadrové palivo. Pri uzavretom palivovom cykle palivo z bazénov ďalej smeruje do medziskladu vyhoreného paliva, kde by malo zotrvať minimálne po dobu 50 rokov, skade sa neskôr presunie do trvalého hlbinného úložiska. Celý palivový cyklus je graficky znázornený na Obr. 2-1.



Obr. 2-1: Palivový cyklus, prevzaté z [19]

2.1 Definícia strednej časti palivového cyklu

Začiatok strednej časti palivového cyklu je možno definovať, ako okamžik, keď sa začína zaväzovať jadrové palivo do reaktoru. Jeho koniec zvyčajne nastane vyvezením vyhoreného paliva z reaktora do bazénov vyhoreného paliva. Elektrárň Dukovany je však v otázke strednej časti palivového cyklu trochu odlišná, ako iné jadrové elektrárne s tlakovodnými reaktormi. V Dukovanoch obvykle stredná časť cyklu zavezením paliva do bazénov nekončí, pretože, toto už vyhorené palivo sa zvyčajne po určitej dobe znovu zaväzuje na obdobie jednej kampane na okraj AZ. Stredná časť palivového cyklu teda v EDU definitívne končí až uložením paliva do kontajnerov CASTOR (suchý sklad), o ktorých podrobnejšie pojednáva kapitola 3.

2.2 Typy stredných častí palivového cyklu

Existujú dve hlavné hľadiská podľa ktorých rozlišujeme typy stredných častí palivových cyklov. Prvé hľadisko delí cyklus na kampaňovitý a kontinuálny palivový cyklus. Druhý pohľad berie zreteľ na spôsob ukladania palivových článkov do aktívnej zóny a delí ich na metódy *in-out* a *out-in*.

2.2.1 Kampaňovitý a kontinuálny spôsob

Kampaňovitý spôsob výmeny paliva v podstate znamená, že stredná časť palivového cyklu sa prakticky rozdelí na niekoľko častí (kampaní), spravidla 3 až 5. Každá kampaň trvá zvyčajne v rozmedzí 12 až 18 mesiacov. V elektrárni Dukovany sa momentálne používa palivový cyklus s piatimi kampaňami, pri čom každá trvá 12 mesiacov. Po skončení kampane nastáva plánovaná odstávka reaktoru, kedy sa jedna pätina paliva vyvezie z reaktora do bazénov s vyhoreným palivom a nahradí sa čerstvými palivovými článkami. Taktiež sa zmenia pozície starých kaziet v aktívnej zóne, tak aby bol výkon čo najefektívnejšie rozložený, a aby zároveň nevznikali príliš veľké fluencie neutrónov, ktoré ohrozujú životnosť reaktorovej nádoby. Kampaňovitý spôsob sa používa v reaktoroch VVER, PWR, BWR.

Kontinuálna výmena paliva znamená, že sa palivo vymieňa za chodu reaktoru (nenastáva odstávka). Typickým príkladom pre tento spôsob sú reaktory AGR, RBMK alebo CANDU, kde sú nové palivové kazety zaväzané horizontálne a vyhorené kazety sú vytáčané von do určeného priestoru. Reaktory, ktoré sú schopné tejto metódy výmeny musia mať vytvorený špeciálny kanál na vyvážanie a zavážanie paliva. Tento kanál značne komplikuje celú technológiu reaktora a tým zvyšuje aj výrobné náklady. Vždy je tu taktiež riziko úniku rádioaktívnych častíc pri výmene paliva. Výhodou však ostáva fakt, že reaktor funguje nepretržite a tým pádom má veľmi ekonomickú prevádzku.

2.2.2 Metódy in-out a out-in

Metóda vkladania palivových vsádzok *in-out* v zásade znamená, že do stredu aktívnej zóny sa vkladajú čerstvé palivové kazety, pričom pri metóde *out-in* sa postupuje opačne a čerstvé palivové súbory sa zakladajú na okraj aktívnej zóny. Každá z metód ma svoje výhody a nevýhody. Pri zakladaní *out-in* je výkon v aktívnej zóne vyvážený omnoho lepšie než je tomu pri *in-out* avšak za cenu len troj-ročných palivových cyklov. Oproti tomu, pri metóde *in-out* sme schopní až päť-ročných cyklov. Návrh aktívnej zóny (*in-out*) je však neporovnateľne náročnejší a je mu preto potrebné venovať výnimočnú pozornosť, pretože v prípade omylu, by sa určité časti AZ mohli dostať na limitné hodnoty výkonu a jedinou možnosťou nápravy je potom už iba zníženie výkonu celého reaktoru. Takýto zákrok sa samozrejme negatívne prejaví na ekonomike prevádzky reaktora, čo je nežiaduce.

2.3 Výrobca jadrového paliva pre EDU

Výhradným dodávateľom jadrových palív pre EDU je ruská korporácia TVEL. Je to najväčší ruský výrobca jadrových palív. Až takmer 17 % jadrových reaktorov (73 reaktorov v Rusku, Slovensku, Česku, Číne, Ukrajine, Bulharsku, Fínsku, Maďarsku a iných krajinách) na celom svete a 30 výskumných reaktorov sú zásobované korporáciou TVEL. Základ jadrovej technológie Ruska tvorí 12 závodov ktoré riadi TVEL. Tri najhlavnejšie sú: *OAO Mašinostroitelnyj zavod v meste Elektrostal* (Obr. 2-2); *OAO Novosibirskij zavod chimkoncentratov v meste Novosibirsk*; *OAO Čepeckij mekhaničeskij zavod v meste Glazov*. Všetky závody sú certifikované v súlade s medzinárodným štandardom ISO 9001:2000 a okrem toho majú hore uvedené závody aj certifikát systému ekologického managementu podľa medzinárodného štandardu ISO 14001:1996. Sú predovšetkým zamerané na ťažbu prírodného uránu, výrobu, dodávku a vývoj jadrového paliva pre ruské a zahraničné jadrové elektrárne. Korporácia zamestnáva celkom 40 000 ľudí. Okrem základnej produkcie však TVEL dodáva aj nejadrové produkty, ako je zirkónium, lítium, vápnik a iné [17].



Obr. 2-2: Výroba jadrového paliva – Elektrostal, prevzaté z [17]

2.3.1 Typy palív vyrábané korporáciou TVEL

Ruský výrobca sa zameriava na produkciu palív pre energetické, lodné a výskumné reaktory. Taktiež vyrába palivá pre:

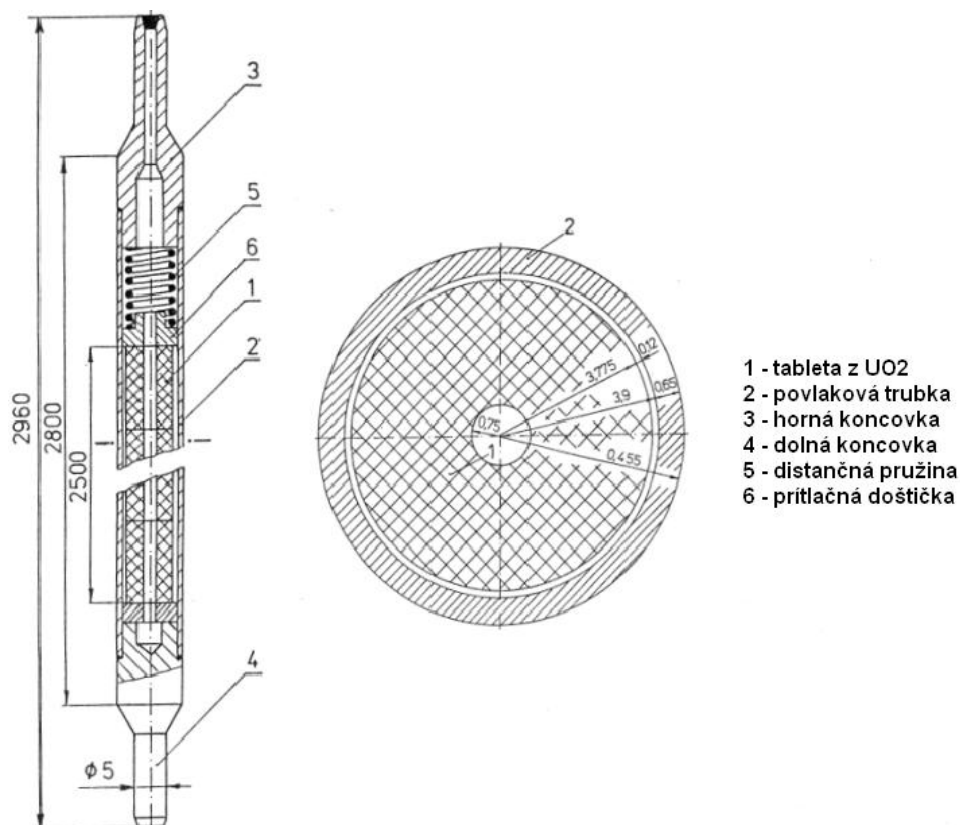
- ľahko-vodné reaktory (VVER-1000, VVER-440, PWR, BWR)
- reaktory využívajúce rýchle neutróny (BN-600)
- uráno-grafitové reaktory (RBMK-1000, EGP-6)
- pre výskumné reaktory (VR-1) [17]

2.4 Konštrukcia paliva VVER 440

V nasledujúcej stati je uvedený stručný popis konštrukcie a materiálov palivového prútiku, palivového súboru a regulačného súboru pre reaktory VVER 440, ktoré vyrába korporácia TVEL v Rusku. Jednotlivé údaje o rozmeroch uvedených ďalej je potrebné brať len orientačne, pretože platia pre pôvodne zavážané palivové súbory a v dnešnej dobe sú mierne pozmenené, no pre predstavu postačujúce.

2.4.1 Palivový prútik

Hlavnú časť palivového prútiku tvoria palivové tablety, ktoré sú obalené povlakom zirkóniovej zliatiny $Zr + 1\% Nb$, ktorá má hrúbku 0,6 mm. V tablete je v strede dierka s priemerom 1,5 mm. Táto dierka je tu hlavne z dôvodu veľkého namáhania tablety kvôli vysokému teplotnému gradientu až 1000 °C. Tablety sú ďalej uložené v trubke, ktorá je uzavretá elektrónovým zväzkom privarenými koncovkami, čo zabezpečuje hermetické uzavretie trubky. V hornej časti sa nachádza distančná pružina, ktorá udržiava tablety v pracovnej pozícii. Palivový prútik má dĺžku celkom 2536 mm pričom dĺžka palivového stĺpca pracovnej kazety je 2420 mm a regulačnej kazety je 2320 mm. Hmotnosť paliva v prútiku pre palivovú kazetu je 1087 g a pre regulačnú kazetu 1041 g. Palivová tableta má vonkajší priemer 7,5 mm a výšku 9 až 11 mm. Hustota palivovej tablety je 10,4 až 10,7 g/cm³. Rez palivovej tablety a palivového prútiku je zobrazený na Obr. 2-3 [4].

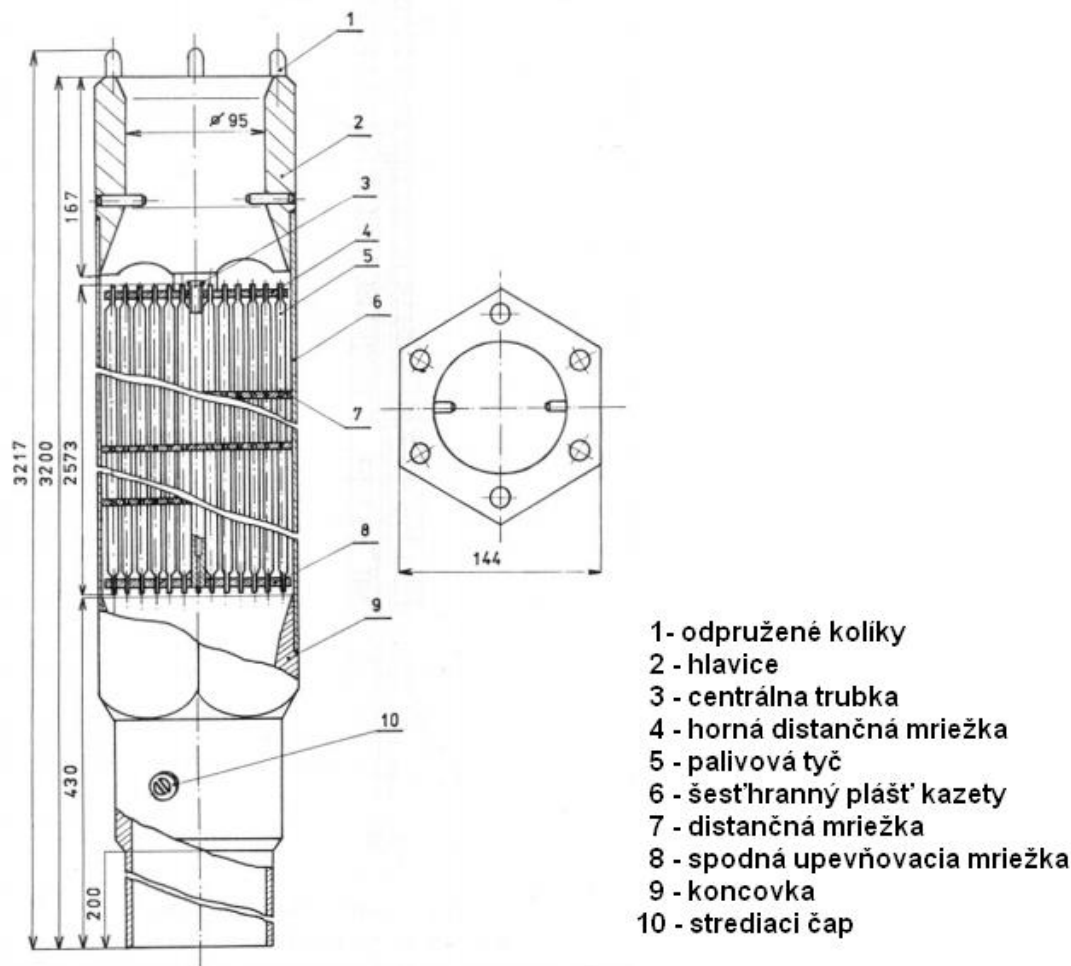


Obr. 2-3: Konštrukcia palivového prútiku, prevzaté z [4]

2.4.2 Palivový pracovný súbor

Palivový pracovný súbor (Obr. 2-4) tvorí základnú jednotku AZ. Jeho nosnú časť tvorí šesťhranný plášť kazety s hlavicou a koncovkou vyrobený zo zirkóniovej zliatiny $Zr + 2,5\% Nb$ (rozteč 144 mm). Obsahuje celkom 126 palivových prútikov (Obr. 2-3), ktoré sú udržiavané

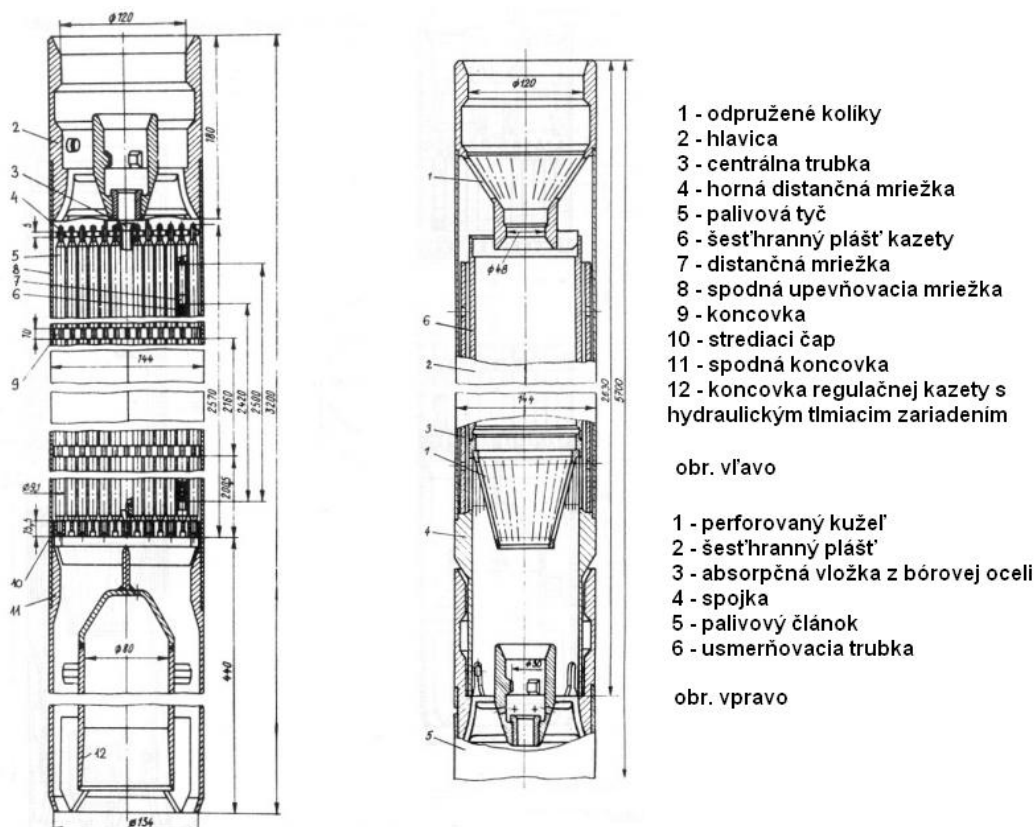
v presnom geometrickom usporiadaní pomocou desiatich distančných mriežok voštinového typu. Mriežky sú v strede spojené centrálnou vodiacou trúbkou zo zirkónia. Pružné uloženie paliva zabezpečuje 6 odpružených kolíkov zabudovaných v hlavici palivového súboru. V spodnej nosnej doske je palivový súbor uložený valcovou koncovkou. Fixácia polohy palivového súboru je zabezpečená strediacim čapom, ktorý je upevnený v spodnej vodiacej časti [4].



Obr. 2-4: Konštrukcia palivového pracovného súboru, prevzaté z [4]

2.4.3 Regulačný súbor

V reaktoroch VVER 440 sa používajú regulačné kazety, ktoré sú v tzv. tandemovom usporiadaní spolu s palivovým súborom (palivový súbor je zavesený na absorpčnej – regulačnej časti súboru). Absorpčná časť má rovnaký tvar ako palivový súbor (šesťhran) a z vnútornej strany sú upevnené vložky z bórovej oceli obsahujúce dve hmotnostné percentá bóru, ktoré vyplňujú celý vnútorný povrch. V absorpčnej časti regulačného súboru je zavedená prídavná trúbka, ktorá zaisťuje intenzívnejší odvod tepla. V spodnej časti (palivová časť) regulačného súboru je pripojené tlmiace zariadenie, ktoré tlmí pád celého súboru pri automatickom odstavení reaktora. Na Obr. 2-5 je zobrazený rez regulačným súborom s orientačnými údajmi o rozmeroch (pôvodne zavázané súbory) [4].



Obr. 2-5: Konštrukcia regulačného súboru, prevzaté z [4]

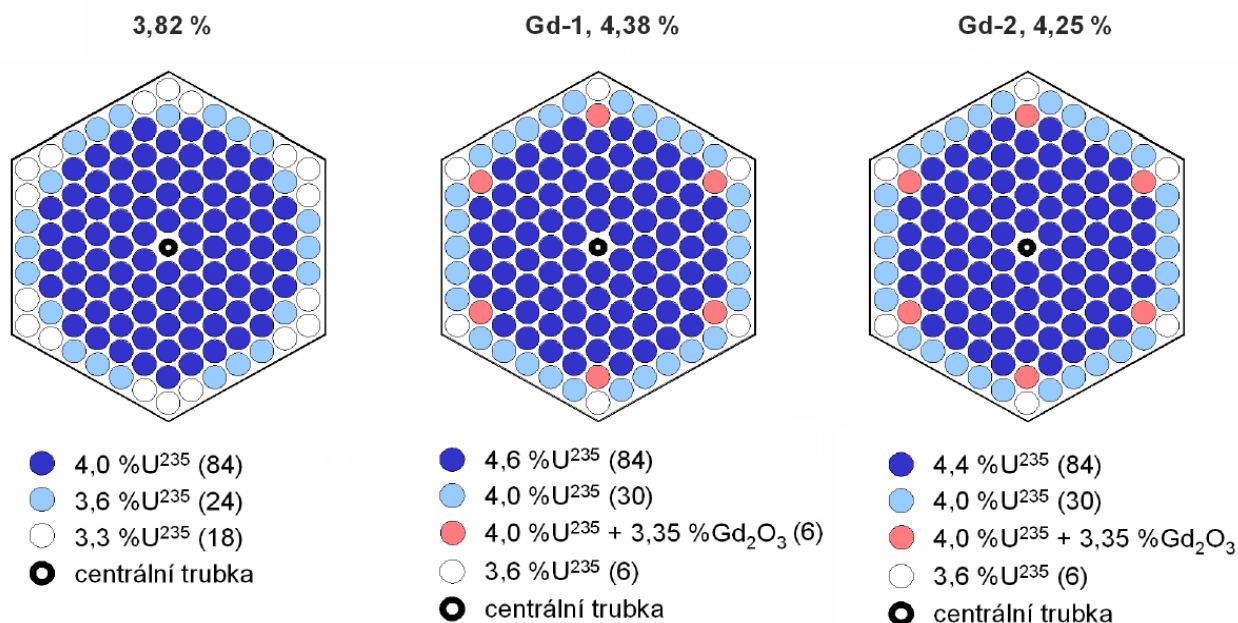
2.5 Prehľad používaných palív v EDU

Pôvodný (projektový) palivový cyklus jadrovej elektrárne Dukovany predpokladal využívanie paliva v trojročných kampaniach. Metóda zavážania *out-in*, kedy sa na okraj aktívnej zóny zavážali čerstvé palivové súbory sa ukázala ako neekonomická. Podľa projektu elektrárne sa priemerne zavážalo medzi každou kampaňou 80 súborov s obohatením 3,6 % ^{235}U a 36 súborov s obohatením 2,4 % ^{235}U . Pri úplne prvej palivovej vsádzke je potrebné simulovať vyhorenie paliva, ktoré bude pri ďalšej prevádzke v reaktore prítomné, preto sa v Dukovanoch pristúpilo pri prvej vsádzke k rôznemu obohacovaniu zavážaného paliva. V aktívnej zóne sa tak objavili neprofilované palivové súbory s obohatením 1,6 %, 2,4 % a 3,6 % ^{235}U . Ďalšou jeho nevýhodou boli relatívne vysoké neutrónové dávky na reaktorovú nádobu, ktorej životnosť je limitujúcim faktorom pre životnosť celého reaktorového bloku. Práve preto sa už v roku 1987 začalo s prechodom na štvor-ročný palivový cyklus. Ten je charakteristický schémou zavážania *in-out* pri ktorej sa najviac vyhorené palivo zaváža na okraj aktívnej zóny, čo vedie tiež k zníženiu hustoty toku neutrónov na reaktorovú nádobu.

Aby však bolo možné dosiahnuť cyklus dlhší ako tri roky aj v regulačných súboroch, bolo nutné uskutočniť niekoľko konštrukčných zmien. Stenšená bola obálka a to z 2 mm na 1,5 mm a oceľové distančné mriežky boli nahradené zirkóniovými¹. Obe tieto konštrukčné vylepšenia znížili parazitnú absorpciu neutrónov a stenšenie obálky navyše prinieslo zvýšenie vodo-uránového pomeru [28]. Taktiež sa zvýšilo obohatenie uránom v regulačných súboroch

¹Zirkónium má nižší účinný prierez pre absorpciu neutrónov ako oceľ – menej zachytáva neutróny [5].

a to na 3,6 %. Prechod na úplný štvor-ročný cyklus ale umožnilo až zavedenie palivových súborov s radiálne profilovaným obohatením 3,82 % ^{235}U (Obr. 2-6) [5].



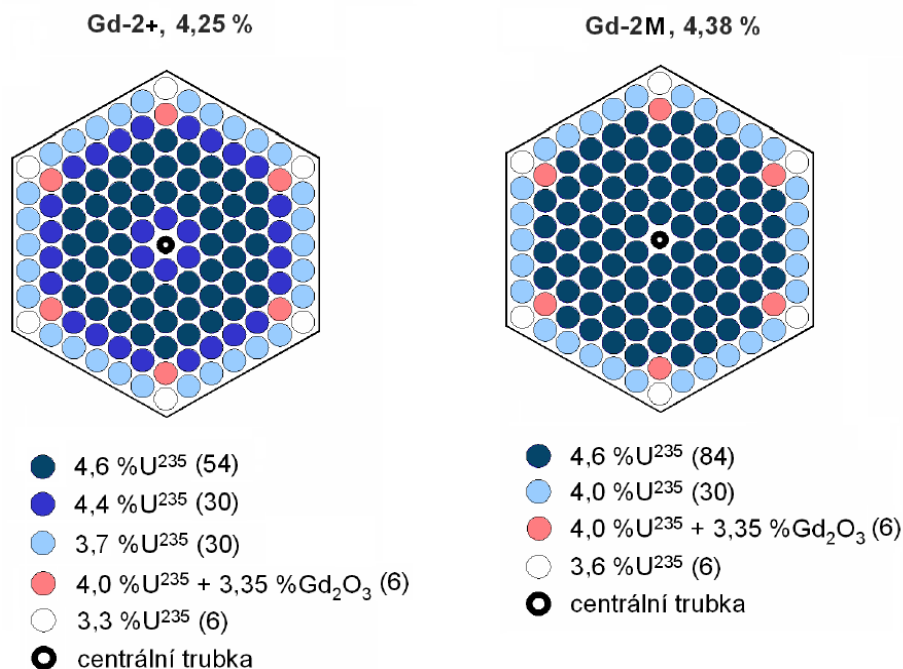
Obr. 2-6: Typy používaných, prevzaté z [28]

2.6 Prechod k 5-ročnému palivovému cyklu

Od roku 2003 sa začali zavádzať palivové súbory s vyhoriavajúcimi absorbátormi na báze gadolína so stredným obohatením 4,38 % ^{235}U (palivo Gd-1). Jedná sa o Gd_2O_3 , ktoré je rozmixované a spečené v tabletách vybraných palivových prútov (homogénna zmes). Sú použité izotopy gadolína, ktoré majú vysoký účinný prierez pre absorpciu neutrónov. Po zachytení neutrónu prechádzajú na izotopy s nízkym absorpčným prierezom (prestanú pohlcovať neutróny). V tomto spočíva ich výhoda, a preto sú označované „vyhoriavajúce“. Na začiatku kampane pomáhajú vyrovnáť výkonovú distribúciu v aktívnej zóne (absorbujú neutróny v miestach, kde by inak bol zvýšený výkon) a s vyháráním paliva sa ich absorpčné vlastnosti strácajú (už nie sú potrebné). Absorbátory na báze bóru, používané v regulačných súboroch (nie sú súčasťou paliva), tiež absorbujú neutróny, ale ich účinnosť klesá s časom len veľmi nepatrne (výkon je potrebné regulovať počas celej kampane) [5].

Zavázaním paliva Gd-1 (Obr. 2-6) bolo možné zahájiť prechod na päť-ročný palivový cyklus. V plnom päť-ročnom cykle sa zaväza už len 72 čerstvých palivových súborov ročne oproti 116 na začiatku prevádzky elektrárne.

Ďalšou inováciou palivového súboru bolo predĺženie palivového stĺpca o 6 cm a zlepšenie pomeru voda-urán (zmenšenie hrúbky prútikov), ktoré umožnilo zníženie stredného obohatenia na 4,25 % ^{235}U . Na tomto palive, označovanom Gd-2 (Obr. 2-6), bol vďaka úpravám v konštrukcii zachovaný rovnaký koeficient násobenia neutrónov k_{ef} (rovnaká výkonnosť) ako pri palive Gd-1. Je potrebné uviesť, že gadolínium umožňuje nielen lepšie vyrovnanie výkonu na začiatku cyklu, ale tiež zvýšenie podkritickosti skladovaných čerstvých súborov (zaistuje jadrovú bezpečnosť pri skladovaní) [5].



Obr. 2-7: Pokročilé palivá typu Gd-2+ a Gd-2M, prevzaté z [28]

2.7 Palivá s vyhorievajúcimi absorbátormi

Predbežné analýzy a nasledujúca prevádzka potvrdili, že palivové vsádzky s palivom s vyhorievajúcimi absorbátormi sa z fyzikálneho hľadiska príliš nelišia od vsádzok bez vyhorievajúcich absorbátorov. Zásadný rozdiel je v tom, že radiálny koeficient (K_q) a objemový koeficient (K_v) nevyrovnanosti výkonu dosahujú svoje maximá medzi 100 a 150 efektívnymi dňami² kedy dochádza k úplnému vyhoreniu gadolína. Potom sa už vsádzka z hľadiska nevyrovnanosti výkonu správa rovnako ako klasické vsádzky (s palivom bez vyhorievajúcich absorbátorov), ktoré majú maximum nevyrovnania na začiatku cyklu a potom sa s rastúcim vyhorievaním nevyrovnanie znižuje [5].

Teplotný koeficient reaktivity moderátoru $|\rho|/T_m$ [%/°C] je pri vsádzkach s vyhorievajúcimi absorbátormi v absolútnej hodnote vyšší ako pri vsádzkach s palivom bez vyhorievajúcich absorbátorov (pôvodných), teplotný koeficient reaktivity paliva $|\rho|/T_p$ [%/°C] je zrovnateľný, koeficient reaktivity kyseliny bórítnej³ $|\rho|/c_B$ [% kg/g] je pri pôvodných vsádzkach v absolútnej hodnote mierne vyšší [5].

Koeficienty reaktivity sú vždy vyjadrené pomerom reaktivity ρ ku sledovanému parametru. Reaktivita ρ (relatívna odchýlka od kritického stavu) súvisí s koeficientom násobenia k_{ef} a vypočíta sa podľa vzorca (2-1)

² Efektívne dni - jeden efektívny deň predstavuje prevádzku reaktoru pri 100 % výkone v trvaní jedného kalendárneho dňa; ak by reaktor pracoval po dobu dvoch dní na výkon 50 %, predstavovalo by to jeden efektívny deň; veličina sa označuje T_{ef}

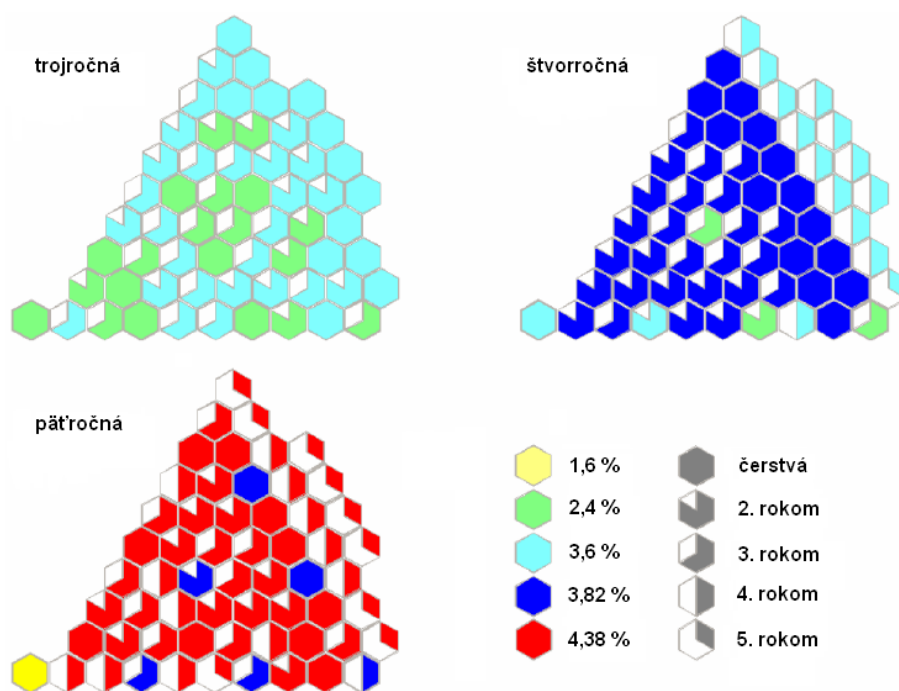
³ Kyselina bórítá – slúži ku kompenzácii vyhorievania, jej koncentrácia sa v priebehu kampane znižuje

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}} \quad (-; -; -; -) \quad (2.1)$$

Ďalším sledovaným parametrom je účinnosť systému havarijných a regulačných kaziet obzvlášť šiestej (regulačnej) skupiny. Na reaktoroch typu VVER-440 sa používa tzv. tandemové usporiadanie, kedy je na vrchnú časť palivového súboru pripojený regulačný súbor a v prípade, že sa regulačný súbor zasúva do aktívnej zóny, vysúva sa príslušný palivový súbor pod aktívnu zónu.

Vzhľadom k tomu, že účinnosť je priamo úmerná druhej mocnine neutrónového toku v mieste zasúvania absorbátora, nie je dôvod, aby bola pri vsádzkach s gadolíniom iná než obvykle. Podobne je tomu aj v prípade tzv. nestacionárnej xenónovej otravy⁴ po zmenách výkonu.

Vzhľadom k tomu, že pri palivových vsádzkach s gadolíniom je na začiatku cyklu v aktívnej zóne väčšie množstvo absorbátora, sú v tomto prípade nižšie kritické koncentrácie kyseliny bóritej [5].



Obr. 2-8: Vývoj palivových vsádzok, prevzaté z [28]

⁴ Nestacionárny xenón – vzniká rádioaktívnym rozpadom produktov štiepenia po zmenách výkonu reaktoru; z hľadiska neutrónovej bilancie v aktívnej zóne ide o nežiaduci izotop pre jeho extrémne vysoký účinný prierez pre absorpciu neutrónov.

3 VONKAJŠÍ PALIVOVÝ CYKLUS

3.1 Predná časť palivového cyklu

Prednú časť palivového cyklu je možné rozdeliť na nasledujúce zložky:

- ťažba a úprava uránovej rudy
- spracovanie rudy
- rafinácia, konverzia a obohatovanie uránu
- výroba paliva

3.1.1 Ťažba a úprava uránu

Základnou zložkou jadrového paliva je urán. Je to ťažký, pomerne stály kov, ktorý patrí medzi tzv. aktinoidy, ktorých všetky známe prvky sú rádioaktívne. Je to taktiež najťažší prirodzene sa vyskytujúci chemický prvok. V prírode sa urán vyskytuje vo forme zmesi izotopov označovaných ako ^{238}U (99,276%), ^{235}U (0,718%) a vo veľmi malom množstve ^{234}U (0,004%). Urán uvoľňuje rádioaktívne žiarenie pričom sa postupne rozpadá na sériu ďalších rádioaktívnych prvkov. To naznačuje, že sa spolu s ním v hornine nachádzajú aj ďalšie prvky a to rádioaktívne izotopy polónia, rádia, radónu, bizmutu, tória a olova [23].

Najčastejším spôsobom ťažby uránu je dobývanie rudy z povrchových lomov, alebo v hlbinných baniach. Treťou možnosťou ťažby je vylúhovanie uránu kyselinou sírovou priamo pod zemou. Z hľadiska ťažby je problémom uránu jeho pomerne malá koncentrácia v prírode. V hlbinných baniach sa za minimálny obsah vhodný pre ťažbu považuje kovnosť pohybujúca sa okolo 0,1% čistého uránu. Za bohaté ložiská, kde sa ťaží uránová ruda komerčne sa považuje koncentrácia uránu už len niekoľko desiatín percenta [23].

Oblasti s najvýznamnejšími ložiskami uránu sa nachádzajú v Kanade, USA, Nigeri, Kazachstane, JAR, Austrálii a Rusku [23]. Palivo, ktoré vyrába spoločnosť TVEL je vyrábané prevažne z uránovej rudy pochádzajúcej z Ruska.

V súčasnej dobe sa odhaduje, že na území Ruska sa nachádza 615 tisíc ton uránu a odhaduje sa, že celkom tu môže byť až 830 tisíc ton uránovej rudy. Hlavné zásoby sú sústredené v baniach v Strelkovskej, Zauralskej, Vitimskej a Elkonskej oblasti. V roku 2006 tu bolo vytŕažených 3200 ton uránu a odhaduje sa, že v roku 2020 sa tu bude ťažiť 5000 ton uránu za rok [8].



Obr. 3-1: Uránová ruda, prevzaté z [20]



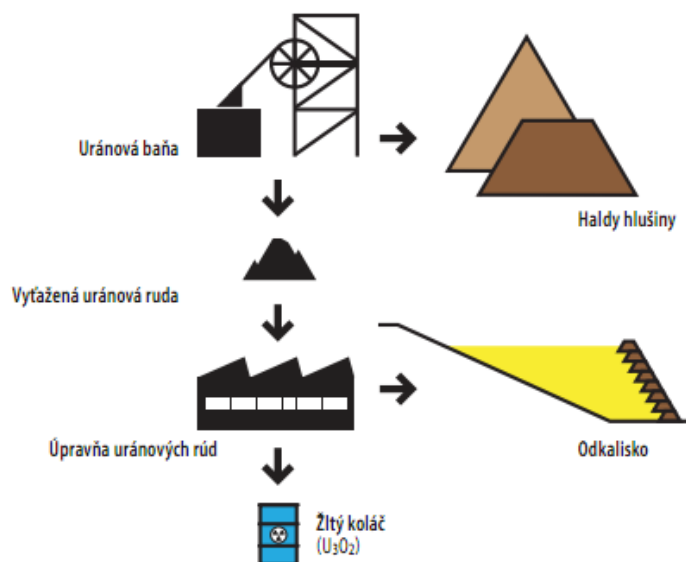
Obr. 3-2: Vydolovaná baňa uránovej rudy a jej zásah na životné prostredie, prevzaté z [13]



Obr. 3-3: Dobývanie uránovej rudy v bani, prevzaté z [20]

3.1.2 Spracovanie rudy

Keďže koncentrácia uránu je veľmi nízka, vyťažená ruda sa zvyčajne hneď na mieste ťažby aj ďalej spracováva. Po rozomletí sa chemicky rozpúšťa, väčšinou v kyseline sírovej. Z tejto rádioaktívnej žieraviny sa potom extrahuje oxid uránu U_3O_8 v podobe žltého prášku, ktorý sa nazýva žltý koláč. Ten je surovinou, ktorá sa predáva na svetovom trhu a po obohatení sa používa na výrobu jadrového paliva, ale aj jadrových bômb [23].



Obr. 3-4: Výroba „žltého koláča“, prevzaté z [23]

3.1.3 Obohatovanie uránu

Ako už bolo spomenuté, pre energetické účely je prírodný urán absolútne nevhodný a preto je potrebné ho obohatiť ^{235}U . Oddelenie hlavných izotopov ^{238}U a ^{235}U je technologicky veľmi náročný proces, pretože z hľadiska chemického správania sú oba izotopy prakticky totožné a odlišnosti vo fyzikálnych vlastnostiach sú veľmi malé. Napriek tomu je možné ich pomocou

moderných technológií oddeliť. Medzi základné technologické postupy patrí elektromagnetická separácia, difúzia, centrifugálna separácia, a ionizácia laserom [24].

3.1.3.1 Elektromagnetická separácia

Zariadenie na elektromagnetickú separáciu sa nazýva calutron. Letiace elektricky nabité ióny separovaného materiálu tu sú oddeľované pôsobením magnetického poľa, ktoré zakrivuje ich dráhu podľa hmotnosti príslušnej častice. Zariadenie poskytuje vynikajúce separačné vlastnosti, avšak jeho praktická účinnosť je veľmi nízka [24].

3.1.3.2 Difúzia

Princíp spočíva v rozdielnych difúzných koeficientoch plynov, ktorý sa využíva hlavne pri oddeľovaní molekúl s výrazne odlišnými hmotnosťami. Keďže plynné zlúčeniny ^{235}U a ^{238}U majú tento rozdiel veľmi malý, pre vysoký stupeň separácie je potrebné tento postup opakovať niekoľko tisíc krát. Difúzne zariadenie potom musí obsahovať stovky kaskád jednotlivých separačných stupňov, kedy v každom stupni prechádza separovaný plyn poréznu prepážku, ktorá spomaľuje ťažšie molekuly a ľahšie postupujú kaskádou o málo vyššou rýchlosťou. Táto technika bola použitá i pri výrobe štiepneho materiálu na prvú atómovú bombu na svete v USA [24].

3.1.3.3 Centrifugálna separácia

V centrifúgach s vysokými otáčkami dochádza k deleniu molekúl podľa ich hmotnosti na základe rozdielneho momentu hybnosti pohybujúcich sa častíc. Tento systém pracuje pomerne efektívne aj pre pomerne hmotné častice s iba mierne odlišnými hmotami a jeho účinnosť je závislá predovšetkým na rýchlosti otáčania centrifúgy. Táto technika sa na separáciu uránu používa prakticky výlučne už od 70-tych rokov 20. storočia a i dnes je hlavným zdrojom obohateného uránu. Spočiatku sa používali centrifúgy s oceľovými lopatkami ktoré dosahovali rýchlosti okolo 330 m/s, no v súčasnej dobe sa začínajú presadzovať materiály z uhlíkových vlákien s rýchlosťou okolo 600 m/s. Teoretické možnosti Kevlaru dovoľujú rýchlosti až okolo 1100 m/s. Pre výrobu kvalitného štiepneho materiálu je stále nutné použiť kaskády centrifúg v rádoch stoviek až tisícov kusov. Napriek tomu je energetická náročnosť o mnoho nižšia, ako pri difúznom delení izotopov [24].

3.1.3.4 Ionizácia laserom

Táto metóda, označovaná tiež *AVLIS* (*atomic vapor laser isotope separation*) spočíva v skutočnosti, že veľmi jemne naladený laser môže svojím žiarením excitovať iba plynné atómy jedného izotopu deleného prvku, zatiaľ čo ostatné izotopy zostávajú v základnom stave. Ionizované izotopy je potom možné oddeliť elektromagneticky, alebo reakciou s chemickou látkou. Táto technika je teoreticky veľmi perspektívna, avšak dosiaľ nebola použitá pre separáciu izotopov uránu v nijak veľkom meradle. V súčasnej dobe je iba testovaná v laboratórnom merítku pričom základný problém je vyladiť laser do takého stavu, aby excitoval prednostne iba vybraný izotop [24].

3.2 Zadná časť palivového cyklu

Zadnú časť palivového cyklu tvorí:

- Dočasné skladovanie vyhoreného paliva
- Prepracovanie vyhoreného paliva
- Definitívne uloženie vyhoreného paliva

3.2.1 Dočasné skladovanie vyhoreného paliva

Sklady vyhoreného jadrového paliva sú považované za jadrové zariadenia, a preto sa na ne vzťahuje špeciálna legislatíva. Základná požiadavka pre bezpečnú prevádzku skladov vyhoreného jadrového paliva však ostáva tak, ako u všetkých jadrových zariadení schopnosť preukázať, že sklad nebude ohrozovať bezpečnosť obyvateľstva a nebude mať negatívny vplyv na životné prostredie.

Takisto ako pri jadrových elektrárnach, aj tu platí princíp ochrany do hĺbky, tzn. vytvárať viacnásobné bariéry, ktoré zaručujú tienenie, tesnenie a naplnenie základných požiadaviek zaistenia jadrovej bezpečnosti podľa zákona. Pri posudzovaní bezpečnostných správ skladov vyhoreného jadrového paliva sa najväčší dôraz kladie na nasledujúce časti:

- Podkritickosť
- Tienenie
- Tesnosť (izolácia rádioaktívneho obsahu pomocou zádržných systémov)
- Odvod zostatkového tepla

3.2.1.1 Mokré sklady vyhoreného jadrového paliva

Po odstavení, vychladení a otvorení reaktora sú pomocou špeciálneho zariadenia (zavážacím strojom) z reaktora premiestnené palivové články do skladovacieho bazéna. Všetky manipulácie s vyhoreným palivom sa musia robiť pod 3 až 6 metrovou vrstvou vody. Vyhorené palivo je zdrojom veľkej rádioaktivity a tepla. Vyhorené palivové články musia byť pri transporte i počas skladovania trvalo v chladiacom a tieniacom prostredí, ktoré tvorí voda.

Bazén vyhoreného paliva (*Obr. 3-5*) je spojený so šachtou reaktora cez transportný kanál. V bazéne sú rošty, do ktorých sa ukladajú vyhorené palivové kazety na dobu minimálne 7 rokov. Teplota vody je v bazéne udržiavaná pomocou chladiacich zariadení na úrovni 40-50 °C. Limitnú úroveň aktivity vody v bazéne udržiava čistička vody. Na čistenie sa používajú mechanické, kationové a aniónové filtre. Takto upravená voda sa vracia späť do bazéna. Po uplynutí potrebnej doby skladovania v bazéne pri reaktore sa vyhorené palivo preváža do medziskladu vyhoreného paliva [29]

Medzisklad vyhoreného paliva sa nachádza mimo budovy reaktora. Slúži na dlhodobé skladovanie paliva pri otvorenom palivovom cykle na 50 rokov a pri zatvorenom palivovom cykle na 3-10 rokov. V mokrých medziskladoch sa palivové články skladujú v bazénoch naplnených vodou v roštach resp. v skladovacích púzdrach transportných kontajnerov [29].

Hlavné nevýhody bazénových systémov je technická a finančná náročnosť výstavby, taktiež nutnosť inštalácie aktívnych systémov, ako sú čerpadlá na chladenie, a chemickú úpravu chladiaceho média. V neposlednom rade je nutné spomenúť i tvorbu sekundárnych rádioaktívnych odpadov. Medzi hlavné výhody patria výborné chladiace a tieniace vlastnosti vody ako i ľahká vizuálna kontrola skladovaných palivových článkov a ich prístupnosť.



Obr. 3-5: Bazén - sklad vyhoreného jadrového paliva, prevzaté z [7]

3.2.1.2 Suché sklady vyhoreného paliva

V posledných rokoch je väčšina novovybudovaných skladov vyhoreného jadrového paliva tzv. „suchých“. V týchto skladoch sa palivové články ukladajú do oceľových alebo betónových kontajnerov chladených vzduchom. Ich výstavba je dokonca ešte nákladnejšia ako u skladov mokrých, avšak majú nezanedbateľné výhody, ako napr. využívanie pasívneho systému chladenia. Tento systém je založený na prirodzenom odvode tepla vedením a prúdením. Ďalšia výhoda je, že pri skladovaní v suchých skladoch nevznikajú rádioaktívne odpady a vyžadujú len minimálnu obsluhu. K nevýhodám patrí hlavne obtiažny prístup a teda aj náročná kontrola skladovaných súborov. Suché sklady môžeme ďalej rozdeliť [9]:

- Kontajnerové sklady využívajúce transportné a skladovacie kontajnery
- Kobkové typy skladov
- Silá, betónové kanistry

3.2.1.3 Kontajnerové sklady

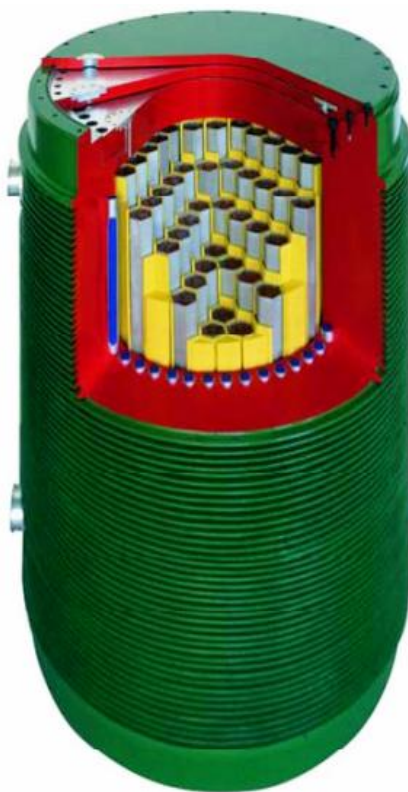
Kontajnerové sklady majú pôvod v kovových prepravných kontajnerov. Ich konštrukciu tvorí mohutná kovová stena, ktorá zabezpečuje tienenie a ochranu voči mechanickému poškodeniu. Napĺňanie kontajnerov prebieha pod vodou, ktorá sa následne odčerpá. Podkritickosť sa dosahuje použitím hliníka, alebo ocele s prímесou bóru a vhodné geometrické usporiadanie koša. Tieto kontajnery sa umiestňujú buď do budov (Dukovany), alebo na voľné priestranstvo (Surry – Virginia Power, USA). Oba spôsoby majú svoje výhody a nevýhody. Budovy chránia kontajnery pred poveternostnými vplyvmi a tienia slnečné žiarenie. Steny budovy fungujú taktiež, ako ďalšia prídavná bariéra (tienenie). S projektovaním budovy však opäť narastajú náklady, či už so samotnou výstavbou, alebo údržbou. Tiež je potrebné myslieť na prípadné zrútenie budovy a následné chladenie kontajnerov, ktoré môže byť značne obmedzené kvôli troskám [11].



Obr. 3-6: Medzisklad vyhoreného paliva v Dukovanoch, prevzaté z [15]

3.2.1.4 Medzisklad vyhoreného paliva Dukovany

Medzisklad vyhoreného jadrového paliva v EDU (Obr. 3-6) je využívaný pre dlhodobé skladovanie vyhoreného jadrového paliva z reaktorov typu VVER-440, ktoré tu sú prevádzkované. Vyhorené jadrové palivo sa skladuje v obalových súboroch typu CASTOR 440/84 (Obr. 3-7). Celková kapacita medziskladu je 60 kusov obalových súborov v prvej budove a 133 kusov obalových súborov v druhej budove. Podrobné parametre o obalovom súbore CASTOR 440/84 sú uvedené v Tab. 3-1.



Obr. 3-7: Kontajner CASTOR 440/84, prevzaté z [18]

Tab. 3-1 Základné údaje a parametre kontajneru CASTOR 440/84, prevzaté z [6]

Rozmer	4080mm
Priemer	2660mm
Váha kontajneru pri naplnení	116,1t max
Kapacita	84 VVER 440 F.A.
Maximálne počiatkové obohatenie	3,87 wt % U-235
Maximálne priemerné ohrievanie	50 Gwd/MTHM
Maximálny tepelný výkon	25 kW
celková aktivita	2,7 E+17 Bq

3.2.1.5 Kontajnery transportné a skladovacie

Nazývajú sa tzv. kontajnery dvojúčelové. Boli naprojektované pre účely skladovanie a takisto transport vyhoreného jadrového paliva. Príkladom je CASTOR 440/84 (*Obr. 3-7*) používaný v EDU. Je možné naplniť ho priamo v reaktorovej sále a následne transportovať do suchého skladu. Vďaka tomu sa ušetrí zbytočná manipulácia s palivom, ktorou sa zvyšuje riziko úniku škodlivého žiarenia. Dôležitým aspektom je jeho schopnosť zachovať si potrebné vlastnosti počas obdobia skladovania a neskôr vyhovieť požiadavkám pre transport v budúcnosti [11].

3.2.1.6 Kobkové sklady

Sú to robustné betónové zásobníky s dutinami v ktorých sa skladuje palivo. Sú modulárne usporiadané a preto sa dajú skladovacie kapacity relatívne ľahko rozširovať postupne. Palivové články sú umiestňované do kovových trubiek ktoré sú napustené inertným plynom a často je tu monitorovaná tesnosť. Chladenie sa zabezpečuje buď prirodzene prúdením, alebo pomocou okruhu s chladiacim vzduchom. Kobkové sklady sú pravdepodobne najekonomickejšia forma skladovania vyhoreného jadrového paliva (záleží na objeme skladovaného paliva), avšak prichádza s nimi aj rada nevýhod, ako napríklad náročný prístup k uskladneným palivovým článkom a nutnosť manipulácie s vysoko aktívnym palivom pomocou robotov na diaľku [11].

3.2.1.7 Silá alebo betónové kanistry

Vyhorené jadrové palivo sa umiestňuje do oceľových puzdier, ktoré sa následne ukladajú do betónovej schránky. Tento systém je v podstate obdoba kobkových skladov s tým, že kobka je izolovaná jednotka. Systém má pasívne chladenie [11].

3.2.2 Prepracovanie vyhoreného paliva

Kľúčová, takmer unikátna vlastnosť jadrovej energie je, že vyhorené palivo môže byť znova prepracované. To znamená, že v už raz použitom palive sa znova obnovia štiepne a množivé materiály, s cieľom poskytnúť nové palivo pre už existujúce, ale aj budúce jadrové elektrárne. Za posledných 50 rokov bol hlavným dôvodom k prepracovaniu paliva obnoviť nevyužitý urán a plutónium z už vyhorených palivových článkov a tým uzavrieť palivový cyklus. Týmto je možné z použitého paliva vyrobiť ďalších 25 % energie. Sekundárny dôvod je, že prepracovaním sa znižuje objem vysoko aktívneho odpadu na približne jednu pätinu. Taktiež úroveň rádioaktivity odpadu z prepracovaného paliva je omnoho nižšia a po približne 100 rokoch klesá neporovnateľne rýchlejšie než pri odpade z klasického „nového“ paliva [22].

Preto niektoré štáty investujú nemalé čiastky do vývoja technológií na prepracovanie paliva. Výsledkom je nové jadrové palivo a vysokoaktívne zvyšky. Takýmto procesom sme schopní

z jednej tony vyhoreného paliva vyrobiť palivo s obsahom až dvoch ton prírodného uránu. Prepracovanie paliva je v podstate zložitý chemický proces, pri ktorom dochádza k separácii uránu od plutónia a ďalších produktov štiepenia. Samotné prepracovanie nie je možné začať, kým vo vyhorenom palive nedôjde k významnému zníženiu aktivity štiepných produktov s krátkym polčasom rozpadu. V súčasnej dobe je rozpracovaných niekoľko desiatok technologických postupov, no najrozšírenejšia metóda je metóda *PUREX* (*Plutoium Uranium Extraction*). Celý proces musí byť realizovaný diaľkovo ovládanými robotmi a manipulátormi. Dôvodom je vysoká rádioaktivita paliva. Ako prvý sa z palivových kaziet odstraňuje zirkóniový povlak. Po rozpustení vyhoreného paliva v kyseline dusičnej sa zo vzniknutého roztoku začnú oddeľovať jednotlivé zložky. Výsledným produktom procesu je urán vo forme oxidu, alebo hexafluoridu a plutónium. Prepracovaný urán a plutónium je možno použiť na výrobu paliva pre rôzne typy reaktorov. Štiepne produkty sa koncentrujú odparovaním, prechodne sa uskladňujú v kvapalnej forme a pred konečným uložením sa fixujú vitrifikáciou⁵ (Obr. 3-8). Ostatky kovového pokrytia palivových kaziet sa spracúvajú ako stredne aktívny odpad [21].



Obr. 3-8: Model vitrificačnej linky, prevzaté z [10]

⁵ Vitrifikácia je spôsob úpravy kvapalných rádioaktívnych odpadov vznikajúcich pri prevádzke jadrovej elektrárne. Metóda spočíva vo výrobe špeciálnych skiel alebo sklokeramiky z kvapalného rádioaktívneho odpadu a sklovitých materiálov pri teplote 900 až 1200 °C. Výhodou metódy je veľmi nízka vylúhovateľnosť a vysoká objemová redukcia výsledného produktu. Nevýhodou je nutnosť použitia pomerne zložitej technológie.[10].

Prepracovanie si môžu dovoliť iba ekonomicky silné štáty. Tabuľka *Tab. 3-2* poskytuje prehľad komerčných prepracovateľských závodov vo svete s údajmi o ich kapacite. Kapacita týchto závodov je nízka a dovoľuje prepracovať iba menšiu časť vyhoreného jadrového paliva zo súčasných jadrových elektrární. To však len dopĺňa fakt, že momentálne ponuka prepracovania vysoko prevyšuje dopyt po ňom. Napriek tomu sú vo výstavbe ďalšie závody, a teda trend smeruje práve opačným smerom.

Tab. 3-2 Svetová kapacita prepracovacích závodov, údaje prevzaté z [22]

palivo	Oblasť	ton za rok
LWR	Francúzsko, La Hague	1700
	VB, Sellafield (THORP)	900
	Rusko, Ozersk (Mayak)	400
	Japonsko, Rokkasho	800
Rest	VB, Sellafield (MAGNOX)	1500
	India (PHWR, 4 bloky)	330
Spolu		5630

3.2.3 Definitívne uloženie jadrového paliva – hlbinné úložisko

Pod pojmom definitívne uloženie paliva sa myslí jeho uloženie v hlbinnom úložisku. Hlbinné úložisko je umele vytvorený, alebo dôkladne upravený prírodný podzemný priestor, umiestnený v hlbokých, stabilných geologických vrstvách. Tento priestor sa musí nachádzať v lokalite, v ktorej sa za posledných minimálne 10 000 rokov neobjavila vulkanická činnosť, zemetrasenie, zaľadnenie, prípadne zaplavenie morom. Vo väčšine prípadov sa však toto kritérium dokonca násobí, a počíta sa s 50 až 100 tisíc rokmi. Všetky práce smerujú k cieľu aby sa zamedzilo kontaktu uloženého materiálu a ľudstva v budúcnosti. Preto projektovaniu samotného úložiska predchádza finančne náročná prieskumná práca a vývojová činnosť.

Vhodné geologické podklady:

- Soľné vrstvy
- Usadené horniny
- Kryštalické horniny
- Metamorfované horniny
- Tufy
- Granity (žuly)

3.2.3.1 Bezpečnostné bariéry

Hlbinné úložisko tvorí systém bezpečnostných bariér, ktoré chránia životné prostredie a človeka od škodlivého rádioaktívneho žiarenia. Prvá bariéra znehybňuje rádionulidy v odolnej a nerozpustnej chemickej forme. Pre vysoko-aktívne odpady, by sa mohlo použiť borosilikátové sklo, alebo keramické materiály. Pri stredne-aktívnych materiáloch zasa cement alebo bitúmen⁶. Bolo by možné použiť taktiež metódu syntetických skál, čo znamená zabudovanie odpadu do chemicky vytvorenej umelej horniny, ktorá sa vyznačuje najmä vysokou trvácnosťou. Táto bariéra by mala mať životnosť až milión rokov. Druhú bariéru tvorí obal, do ktorého sa odpad umiestni. Pre vysokoaktívne odpady sa uvažuje o hrubostenných oceľových kontajneroch, medených nádobách a dokonca aj o titáne. Musí spĺňať požiadavku izolovať odpad od okolia po dobu minimálne 1000 rokov. Stredne-aktívne a nízko-aktívne odpady sa izolujú betónovými

⁶ Bitúmen je organická látka (živica) podobná asfaltu [10]

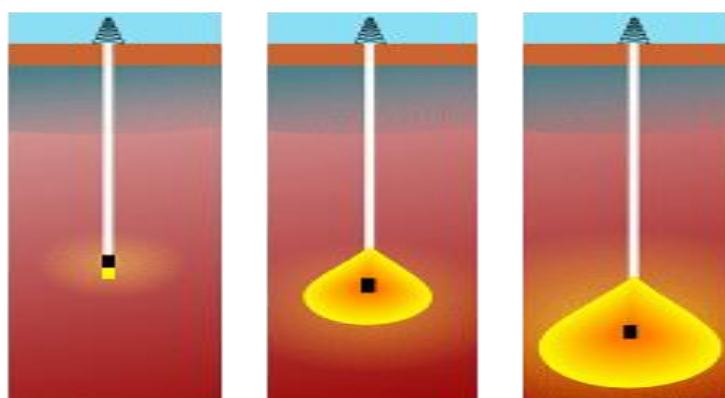
kontajnermi prípadne plechovými sudmi. Tie musia zaistiť tienenie rádioaktívneho žiarenia po dobu aspoň 300 rokov. Ako ďalšiu bariéru môžu tvoriť betónové pakety, do ktorých sa vkladajú plechové kontajnery. Za technickú bariéru sa považuje aj stavebná konštrukcia na povrchu, pod povrchom alebo v geologických formáciách:

- Špeciálne betóny
- Nepriepustné nátery
- Asfaltové alebo ílovité izolácie
- Drenážne systémy

Poslednú bariéru tvorí bariéra prírodná. Je to geologická lokalita, v ktorej sa nachádza hlbinné úložisko. Táto geologická formácia musí byť seizmicky stabilná, a preto sa vždy uvažuje o horninách, ktoré sa dokázateľne nezmenili po dobu niekoľkých miliónov rokov. Tým sa zvyšuje pravdepodobnosť, že zostane stabilná i v nasledujúcich rokoch. Pri výbere horniny je potrebné dávať zreteľ predovšetkým na jej pevnosť, nerozpustnosť a tepelnú stabilitu [12].

3.2.4 Uskladňovanie paliva v síre

V roku 1990 vznikol v Rusku zaujímavý projekt na uskladnenie vyhoreného jadrového paliva v 5 km hlbokých vrtoch vyplnených nízkotavitelným a vo vode nerozpustným materiálom, najlepšie sírou (síra má desať krát nižšiu tepelnú vodivosť ako horniny). Hermeticky uzavretý odpad sa v púzdrach spustí do vrtu, kde teplom, ktoré vyvíja roztaví síru. Jadrový odpad tak zvýši teplotu dna vrtu až na 500 °C. V dôsledku tepelnej rozťažnosti hornín a chemickej reakcie síry sa priemer vrtného otvoru na dne zväčší a celý stĺpec nahromadeného odpadu sa začne posúvať dole. Tak vznikne „kvapka“ (obr. 3-9) s teplotou až 1800 °C. Síra vytvára reakciou s oxidmi železa z okolitých hornín pyrit. Odpad pomaly klesá dole a rýchlosť postupu sa spomaľuje v závislosti na stave rozpadu odpadu (jeho rádioaktivita klesá). Samostatný pokles môže pokračovať až do hĺbky 10 km a jeden vrt sa dá použiť až trikrát. Nerozpustný pyrit tvorí matricu, ktorá zabraňuje úniku rádionuklidov z vrtu po dobu minimálne troch rokov. Bezpečnosť metódy je navyše zaručená hĺbkou vrtov, o čom sa v prípade klasických hlbinných úložísk nedá hovoriť [14].



Obr. 3-9: Uskladňovanie paliva v síre, prevzaté z [14]

4 INÉ TYPY REAKTOROV

Jadrový reaktor je zariadenie, v ktorom sa v hromadnom meradle uskutočňuje samostatne sa udržiavajúca riadená reťazová štiepna reakcia so súčasným odvodom tepla. Konštrukcia jadrového reaktoru musí zabezpečiť niekoľko jeho základných funkcií a to: rozmiestnenie jadrového paliva v AZ, riadenie reťazovej štiepnej reakcie a odvod tepelnej energie z AZ. Z teoretického pohľadu na problematiku by len rôznou kombináciou základných súčastí bolo možné zhotoviť pomerne mnoho typov reaktorov. Niektoré možnosti sa však v praxi vylučujú kvôli fyzikálnym aspektom, alebo jednoducho preto, že by boli príliš nákladné. Reaktory môžeme rozdeliť z hľadiska viacerých kritérií a to podľa neutrónového spektra na:

- tepelné (pomalé)
- epitermálne
- rýchle

Podľa použitej formy paliva:

- homogénne (palivo je rozptýlené rovnomerne v moderátore)
- heterogénne (palivo je vo forme palivových článkov a je od moderátora a chladiva oddelené)

Podľa použitého moderátora a chladiva:

- ľahko-vodné (*LWR, BWR, PWR, VVER*)
- ťažkovodné (*HWR*)
- grafitové (*RBMK, GCR, AGR, HTGR*)
- rýchlo množivé (*FBR*) [3]

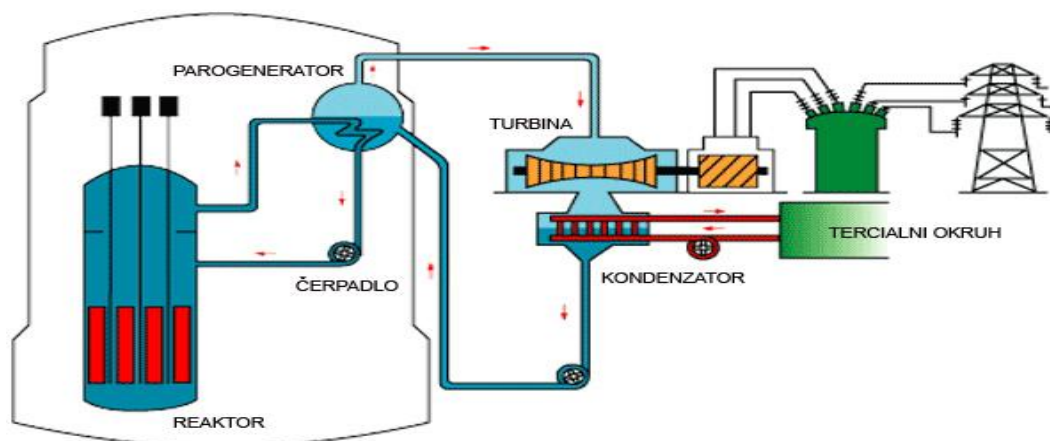
4.1 Reaktory PWR

Reaktor *PWR* (*Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor*), alebo ruský typ *VVER* je dnes najrozšírenejší typ reaktoru na celom svete. Dohromady bolo vybudovaných 271 blokov. I obe české jadrové elektrárne pracujú s týmito typmi reaktorov.

Aktívna zóna je zložená z malých valčekov z UO_2 , ktoré sú naskladané a uzavreté v trubke, ktorá je pokrytá vrstvou zirkóniovej zliatiny (palivový prútik). Zväzky zhruba 130 palivových prútikov tvoria jeden celok nazývaný palivový článok, z ktorého sa ďalej stavia aktívna zóna vo vnútri reaktora. Výmena paliva prebieha kampaňovito v dĺžkach kampaní od 12 do 18 mesiacov pričom palivový cyklus (stredná časť) trvá od 3 do 6 rokov [26].

4.1.1 Výroba elektriny v reaktoroch PWR

Proces výroby elektriny začína v reaktore, kde prúdi pod vysokým tlakom voda, ktorá sa tu ďalej ohrieva. Po ohriatí približne o 20°C je voda hnaná potrubím do PG, kde svojím teplom uvádza do varu vodu v sekundárnom okruhu. Vzniknutá para ďalej poháňa turbínu hriadeľom napojenú na generátor elektrického prúdu. V terciálnom okruhu (kondenzátor) sa para odvedená z turbíny ďalej ochladzuje až kým neskondenzuje na vodu, ktorá sa ďalej používa v sekundárnom okruhu. Kondenzátor je často krát tvorený kondenzačnými vežami, ktoré môžu byť vysoké aj viac ako 150 metrov. Schéma elektrárne pracujúcej s reaktorom PWR je uvedená na *Obr. 4-1* [1].



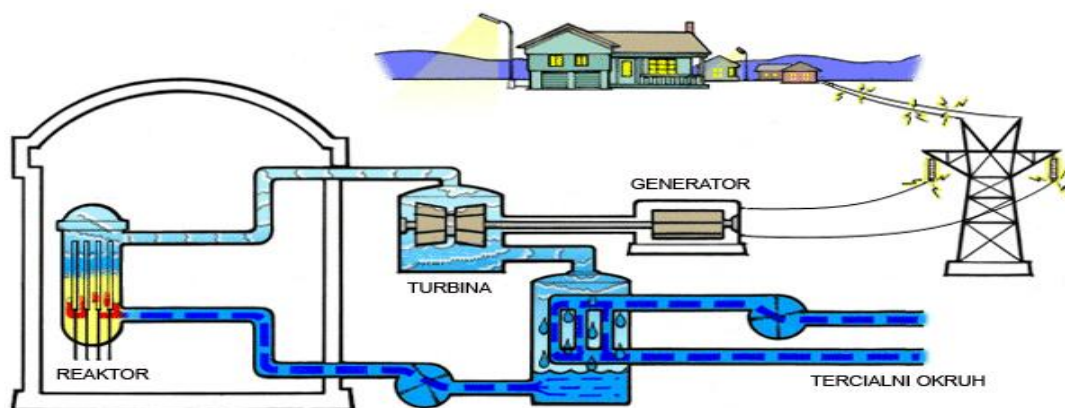
Obr. 4-1: Schéma reaktoru PWR, prevzaté z [26]

4.2 Reaktory BWR

Reaktor *BWR* (*Boiling Water Reactor*), varný reaktor, je druhý najrozšírenejší typ reaktorov na svete (129 vybudovaných blokov). Tento reaktor je moderovaný a chladený obyčajnou vodou. Aktívna zóna je veľmi podobná ako v tlakovodných reaktoroch (PWR). Takisto je zložená z palivových článkov, ktoré sú tvorené palivovými prútikmi. Výmena paliva prebieha kampaňovito každých 12 až 18 mesiacov. Obr. 4-2 zobrazuje schému elektrárne pracujúcej s reaktorom BWR [25].

4.2.1 Výroba elektriny v reaktoroch BWR

Voda sa ohrieva v aktívnej zóne až do varu priamo v aktívnej zóne, kde vzniká para. Keď sa zbaví vlhkosti v podobe kvapiek vody v hornej časti reaktoru, je hnaná priamo do turbíny – reaktory BWR pracujú ako jednookruhové. Z tohto plynie značná nevýhoda a to, že para hnaná na turbínu je rádioaktívna [26].



Obr. 4-2: Schéma reaktoru BWR, prevzaté z [26]

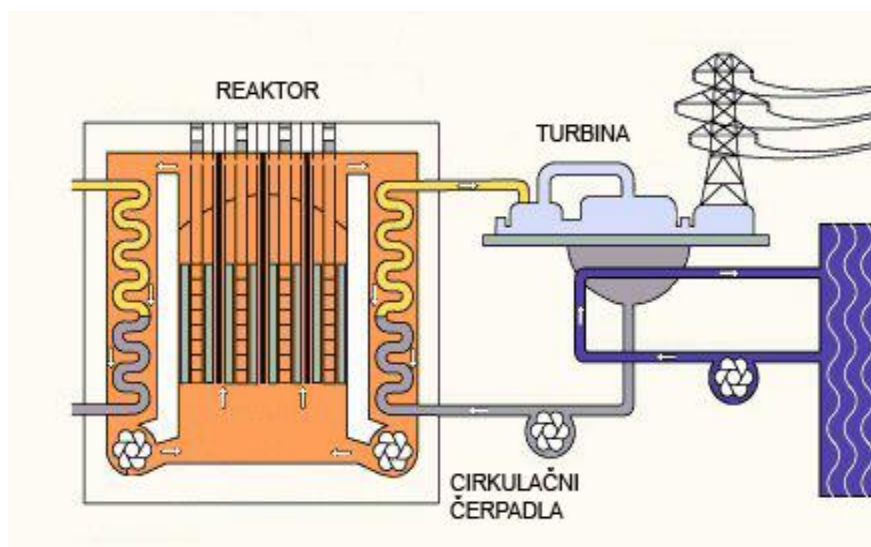
4.3 Reaktory AGR

Reaktory AGR (*Advanced Gas Cooled Graphite Moderated Reactor*) – pokročilé, plynom chladené, grafitom moderované reaktory sa používajú iba vo Veľkej Británii, kde už taktiež viac menej dosluhujú svoju činnosť (bolo vybudovaných 19 blokov). Ako chladiaci plyn sa najčastejšie používa oxid uhličitý CO_2 . Tento reaktor využíva kontinuálnu výmenu paliva. Schéma elektrárne, ktorá používa tento typ reaktoru je na Obr. 4-3.

Aktívnu zónu tvoria palivové články vyrobené z kovového prírodného uránu, pokryté oxidom horčíku. Je v tvare zvislého valca a skladá sa z grafitových blokov, ktorými prechádza niekoľko tisíc zvislých kanálov. Do každého kanála sa nad seba umiestňuje niekoľko palivových tyčí. Celá aktívna zóna je uzavretá v guľovej ocelevej tlakovej nádobe, ktorá je obostavaná betónovou obálkou [25].

4.3.1 Výroba elektriny v reaktoroch AGR

Výroba elektriny prebieha nasledovne: chladiaci plyn prúdi kanálmi okolo palivových tyčí, kde sa zahrieva. Ďalej je potrubím vedený do PG, kde predáva svoje teplo vode v sekundárnom okruhu. V parogenerátore vzniká para, ktorá ďalej poháňa turbínu hriadeľom pripojenú na generátor elektrického prúdu. Ochladený plyn je hnaný turbokompresormi späť do aktívnej zóny, kde sa proces opakuje [26].



Obr. 4-3: Schéma reaktoru AGR, prevzaté z [26]

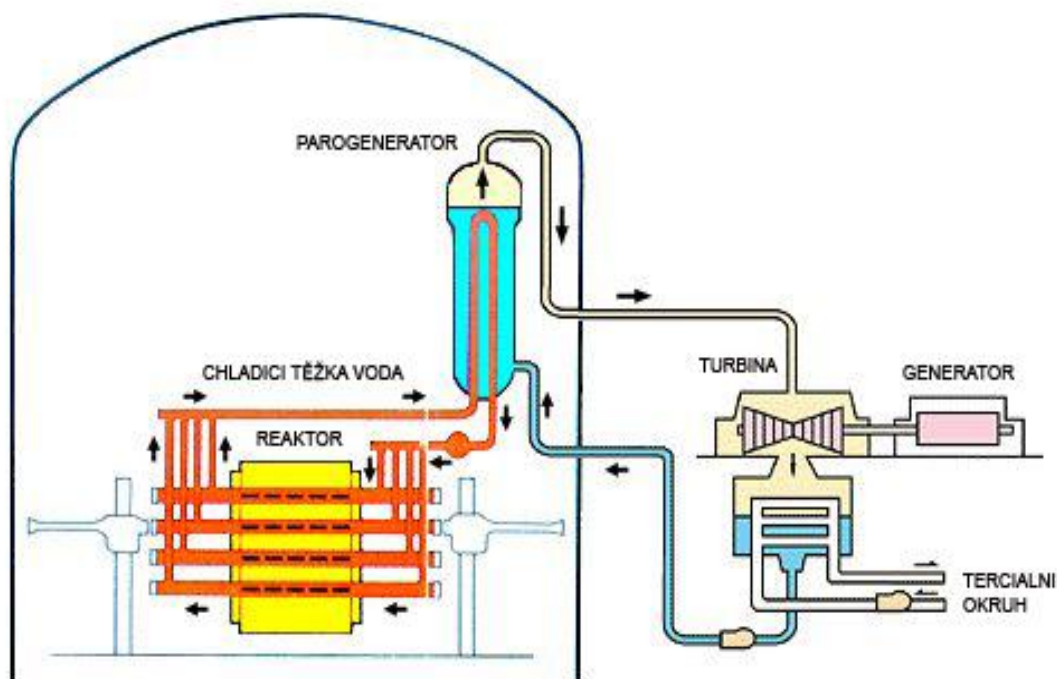
4.4 Reaktory CANDU

Reaktor *CANDU* (*Canada Deuterium Uranium*) je tepelný, ťažkou vodou moderovaný reaktor, ktorý pozostáva z horizontálne uložených valcových nádob nazývaných Calandria. Palivové a chladiace kanály sú taktiež uložené horizontálne. Vstupné a výstupné trubky chladiča (moderátora) vedú cez *Calandriu* a potom do externého výmenníka tepla. Regulačné tyče sa zasúvajú z vrchu a ovládajú distribúciu energie v reaktore a môžu byť použité na odstavenie reaktora. Tieniaca nádoba redukuje žiarenie v blízkosti reaktora.

Ako palivo sa používa prírodný urán, ktorý je lacný a je ho dostatok na celom svete. Vyrába sa vo forme peletiek z UO_2 , ktoré sú uložené v trubkových púzdrach a zoskupené do malých, ľahko uskladnitelných kaziet, z ktorých každá váži 24 kg. Palivo sa mení kontinuálne [27].

4.4.1 Výroba elektriny v reaktoroch CANDU

Chladiaci plyn prúdi kanálmi okolo palivových tyčí, kde sa ohrieva a ďalej je vedený do PG. V parogenerátore predáva plyn svoje teplo vode v sekundárnom okruhu, kde vzniká para, ktorá ďalej poháňa turbínu pripojenú na generátor elektrického prúdu. Ochladený plyn je hnaný turbokompresormi späť do reaktora. Proces výroby elektriny pri tomto type reaktoru je naznačený na Obr. 4-4 [26].



Obr. 4-4: Schéma reaktoru CANDU, prevzaté z [26]

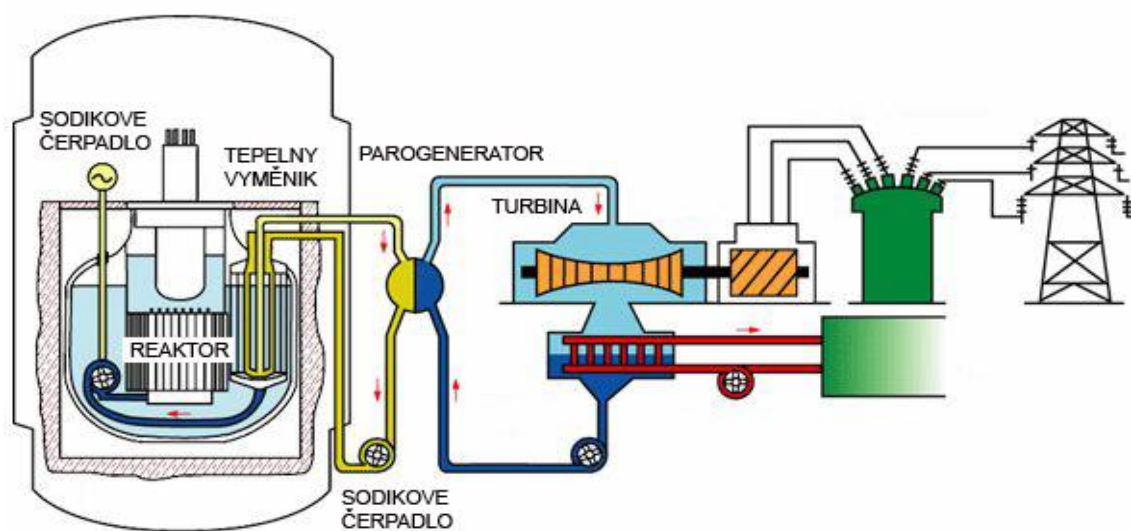
4.5 Reaktory FBR

Reaktory *FBR* (*Fast Breeder Reactor*) – rýchly množivý reaktor sú veľmi perspektívne typy reaktorov. Momentálne pracuje len jeden blok v Rusku (Belojarsk FBR 600) avšak nové bloky sa stavajú v Rusku, Japonsku a Indii. Tento typ reaktoru pracuje bez moderátora a je veľmi efektívny, pretože behom prevádzky vyprodukuje viac plutónia ako sám spotrebuje. V dnešnej dobe, kedy je urán lacný zatiaľ nie je schopný konkurovať iným typom reaktorov. Aktívna zóna je zložená zo zväzkov palivových tyčí, ktoré tvoria valčeky paliva uzavreté v rúrke

z nehrdzavejúcej oceli. Aktívna zóna je navyše obklopená tzv. plodiacim plášťom, ktorý obsahuje urán vo forme UO_2 uzavretý taktiež v rúrkach z nehrdzavejúcej oceli [25].

4.5.1 Výroba elektriny v reaktoroch FBR

Aktívna zóna je v širokej oceľovej nádobe, ktorá je naplnená sodíkom. Sodík sa v reaktore ohrieva a prúdi do výmenníka tepla, kde odovzdáva svoje teplo taktiež sodíku v sekundárnom okruhu. Stade prúdi ohriaty (nerádioaktívny) sodík do PG, kde predáva teplo vode v terciálnom okruhu. Vzniknutá para poháňa turbínu pripojenú na elektrický generátor. Schéma elektrárne pracujúcej s týmto typom reaktoru je na Obr. 4-5 [26].



Obr. 4-5: Schéma reaktoru FBR, prevzaté z [26]

5 TYPY PREKLÁDOK PALIVA V RÔZNE DLHÝCH PALIVOVÝCH CYKLOCH EDU

V tejto stati sa rozoberajú možné spôsoby prekládok jadrového paliva na EDU z hľadiska dĺžky ich trvania. Pravidelné odstávky na EDU sa čiastočne musia podriaďovať pravidelným odstávkam na elektrárni Temelín (ETE). Keďže všetky práce, ktoré prebiehajú na týchto elektrárnach počas odstávok vykonávajú viac menej tie isté firmy, musia sa odstávky presne načasovať na obdobia, ktoré sa neprekrývajú. V súčasnosti prebiehajú odstávky v nasledujúcich termínoch: na bloku EDU 1 sa začína približne v polke januára a končí sa začiatkom februára (odstávka trvá asi 21 dní). Potom nasleduje blok EDU 2 – asi od polovice apríla do začiatku mája. V polke mája sa firmy presťahujú na elektráreň Temelín a prebehne odstávka na bloku ETE 1 ktorá trvá asi do polovice júla (krátka odstávka trvá približne 62 dní). Po skončení sa odstavuje blok ETE 2, ktorý začína znova nabiehať na plný výkon v druhej polovici septembra. Neskôr v septembri prebieha odstávka na bloku EDU 3 a v závere roka od polovice novembra do začiatku decembra je odstavený blok EDU 4. Počas týchto krátkych odstávok dochádza hlavne k zavážaniu čerstvých palivových súborov a prekladaniu starých súborov v aktívnej zóne. V neposlednom rade prebiehajú taktiež technické prehliadky zariadení.

Aktívna zóna sa skladá z 349 palivových súborov z čoho 37 je regulačných kaziet a 312 palivových kaziet. Pre zjednodušenie sa vždy uvažuje tzv. „šestinová symetria“ z ktorej sa vychádza aj pri návrhu aktívnej zóny. Inými slovami, AZ sa rozdelí na 6 symetrických častí pričom každá obsahuje 58 palivových súborov plus jednu centrálnu kazetu, ktorá je spoločná pre všetky časti (centrálna kazeta je regulačná kazeta). To znamená, že pri návrhu sa počíta s 52 palivovými kazetami a 7 regulačnými kazetami, ktoré je potrebné vymieňať v čase pravidelných odstávok reaktorov.

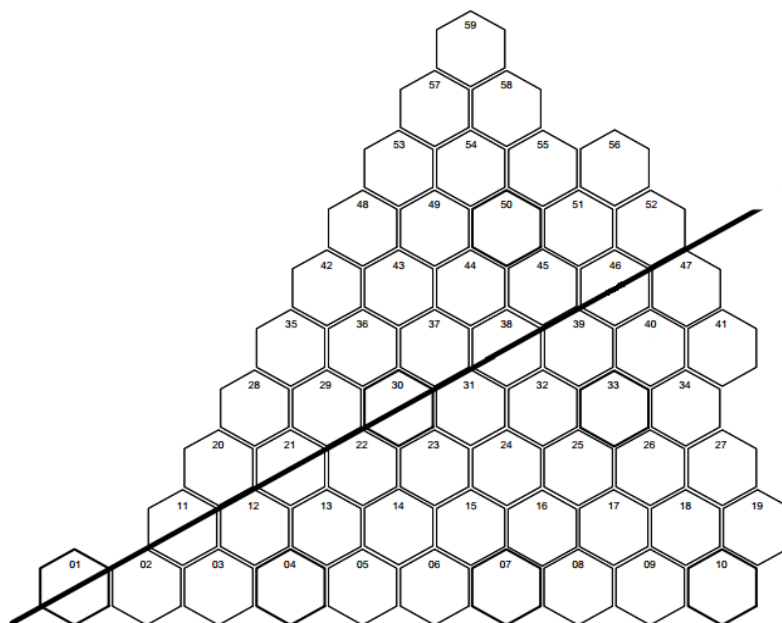
5.1 Topológia šestinovej symetrie

Pre ďalší opis palivových cyklov je potreba predstaviť topológiu aktívnej zóny. Ako už bolo uvedené, AZ sa skladá z 349 palivových súborov (či už pracovných alebo regulačných), ktoré sa ďalej rozdeľujú na šesť symetrických častí. Každá sa skladá z $58 + 1$ kaziet. Tie sú rozložené do 12 skupín. Prvá sa nachádza úplne na okraji zóny a skladá sa zo štyroch kaziet. Nasleduje druhá skupina z deviatich kaziet, tretia podobne z deviatich kaziet. Štvrtá skupina má osem pozícií, piata skupina sedem pozícií, šiesta šesť pozícií, siedma päť pozícií, ôsma štyri pozície, deviata tri pozície, desiata dve pozície, jedenásta a dvanásta po jednej pozícii.

Každá pozícia má svoje jedinečné číslo (1 - 59) podľa ktorého vieme presne učiť, kde sa ktorý palivový súbor nachádza. Číslovanie začína na centrálnej kazete číslom 1 a pokračuje postupne cez jednotlivé skupiny až ku kraju aktívnej zóny. Keď je na konci, presunie sa o riadok vyššie a pokračuje rovnakým smerom. Rozloženie jednotlivých kaziet je zobrazené na *Obr. 5.1* a *Tab 5.1* uvádza zoznam kaziet v jednotlivých skupinách.

Tabulka 5-1 Prehľad obsahu jednotlivých skupín šestinovej symetrie pre VVER 440

Skupina	Počet pracovných kaziet	Počet regulačných kaziet	Súčet	Pozície
1.	4	0	4	41; 47; 52; 56
2.	9	0	9	19; 27; 34; 40; 46; 51; 55; 58; 59
3.	6	3	9	10; 18; 26; 33; 39; 45; 50; 54; 57
4.	8	0	8	9; 17; 25; 32; 38; 44; 49; 53
5.	7	0	7	8; 16; 24; 31; 37; 43; 48
6.	4	2	6	7; 15; 23; 30; 36; 42
7.	5	0	5	6; 14; 22; 29; 35
8.	4	0	4	5; 13; 21; 28
9.	2	1	3	4; 12; 20
10.	2	0	2	3; 11
11.	1	0	1	2
12.	0	1	1	1



Obr. 5-1: Šestinová symetria aktívnej zóny a čísla jednotlivých pozícií, prevzaté z [4]

5.1.1 3-ročný palivový cyklus

Trojročný palivový cyklus bol na EDU pôvodný, projektový a bol navrhnutý dlho pred vybudovaním elektrárne. Používal metódu zaväzovania *out-in*. Pristúpilo sa k nemu, pretože bol overený a bezpečný. Netrvalo však dlho a v literatúre sa objavila nová, modernejšia metóda zaväzovania *in-out*. Preto sa už po dvoch rokoch spustenia reaktora elektrární začala pripravovať na prechod k tri a pol ročnému cyklu.

Pri troj-ročnom palivovom cykle sa do aktívnej zóny zaväzovalo prvým a druhým rokom vždy 114 palivových súborov a tretím rokom 121 so stredným obohatením ^{235}U 2,4 a 3,6 %. Každá kampaň trvala 300 efektívnych dní.

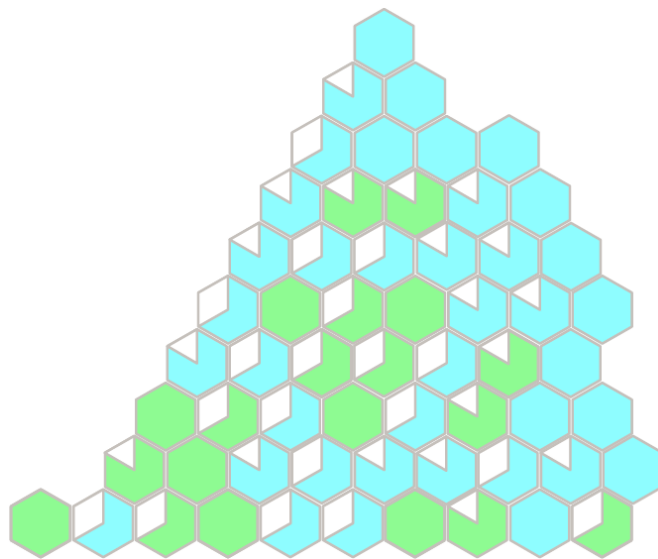
Čerstvé palivové súbory sa zaväzovali hlavne na okraj aktívnej zóny a teda do skupiny 1, 2 a 3. Vyskytovali sa však aj skupinách 4, 6 a 10 no len s obohatením 2,4 %. Presná schéma rozloženia kaziet je na Obr. 5-2 [4].

Výhody:

- Jednoduchšie palivo
- Nižšie obohatenie
- Jednoduchý návrh aktívnej zóny
- Dobré rozloženie výkonu

Nevýhody:

- Vysoká fluencia neutrónov na okraji aktívnej zóny (radiačné starnutie tlakovej nádoby)
- Nutnosť žihania tlakovej nádoby po cca. 30 rokoch prevádzky
- Nízke vyhorenie paliva
- Krátke cykly (vysoká spotreba palivových kaziet)
- Veľmi neekonomické



Obr. 5-2: Rozmiestnenie kaziet v aktívnej zóne pre 3-ročný palivový cyklus, prevzaté z [28]

5.1.2 4-ročný palivový cyklus

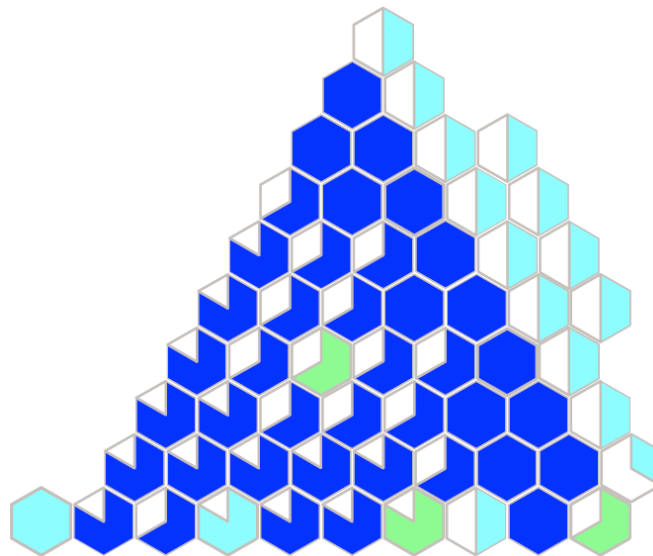
Na štvor-ročný palivový cyklus sa v Dukovanoch začalo prechádzať v roku 1987 teda už dva roky po spustení elektrárne. Prechod nebol uskutočnený hneď kvôli nedostatočným informáciám a skúsenostiam s palivovými vsádzkami *in-out* na reaktoroch VVER, z čoho pochopiteľne plynuli obavy. Ďalším dôvodom bolo obohatenie paliva, ktoré by nebolo schopné udržať plný štvor-ročný cyklus. Najprv bol teda cyklus nastavený na 3 a pol roka a neskôr sa prešlo na úplný štvor-ročný cyklus, ktorý sa na Dukovanoch docielil vďaka novému radiálne profilovanému palivu s obohatením 3,82 % a stenšeniu zirkóniovej obálky z dvoch na jeden a pol milimetra v roku 1997. V dnešnej dobe sa tento cyklus stále používa hlavne v Rusku, kde však majú úplne iné podmienky na využitie vyhoreného paliva, ktoré prepracovávajú a ďalej používajú v reaktoroch RBMK.

5.1.2.1 Rozloženie kaziet v aktívnej zóne

Zloženie AZ by mohlo vyzeráť nasledovne. Keďže sa pri štvor-ročnom cykle využíva metóda zavážania *in-out*, do prvej a druhej skupiny sa vkladajú najstaršie teda 3 ročné kazety. Ak sa v bazéne vyhoreného paliva nachádza kazeta ktorá obsahuje relatívne vysoký obsah ^{235}U ,

je možno ju vsunúť do druhej skupiny, čím sa samozrejme znižujú náklady a zároveň sa nižším tokom neutrónov šetrí reaktorová nádoba. Tretia skupina je obsadená len čerstvými kazetami a jednou dvojročnou. Štvrtá skupina obsahuje opäť čerstvé kazety a dve dvojročné. Posledná čerstvá regulačná kazeta sa vsúva do centrálnej trubky (skupina 12). Dvojročné kazety sú vložené v piatej skupine kde sa nachádza aj jedna trojročná. Šiesta skupina obsahuje tri ročné a tri dvojročné kazety. Siedma skupina obsahuje tri ročné a dve dvojročné kazety. V ôsmej a deviatej skupine sú výlučne ročné kazety, desiata obsahuje jednu ročnú a jednu dvojročnú kazetu. V jedenástej je opäť ročná a v centrálnej skupine (12. skupina) čerstvá regulačná.

Z tejto modelovej situácie logicky vyplýva, že pri štvor-ročnom palivovom cykle je potreba pri každej odstávke zaviesť 13 pracovných kaziet a 1 až 2 regulačné. Model na štyri roky by mohol vyzeráť napríklad takto: (13+2 - 13+2 - 13+1 - 13+2). Presná schéma rozloženia kaziet je na Obr. 5-3 [4].



Obr. 5-3: Rozmiestnenie kaziet v aktívnej zóne pre 4-ročný palivový cyklus, prevzaté z [28]

5.1.3 5-ročný palivový cyklus

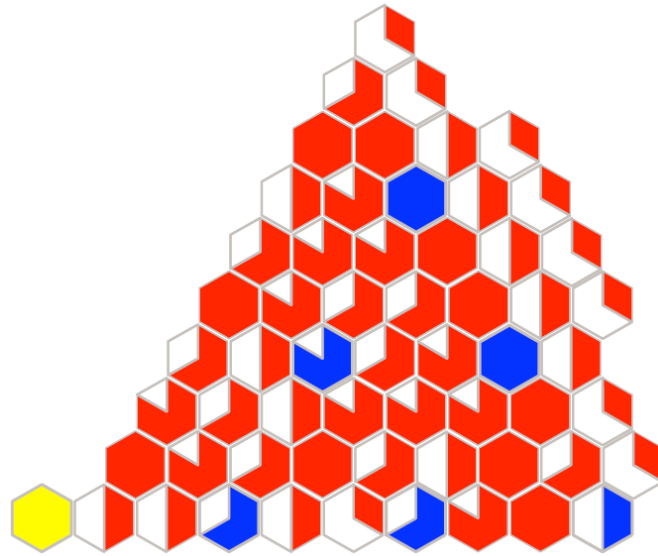
Päť-ročný palivový cyklus sa používa aj na elektrárni Dukovany. Ukazuje sa ako najefektívnejší spomedzi všetkých spomínaných. Uvažovalo sa o ňom ešte pred zavŕšením úplného štvor-ročného cyklu. Pri tak dlhých cykloch však nastáva rovnaký problém s palivom, ako tomu bolo pri prechode z troj na štvor-ročný cyklus a to je jeho obohatenie. Bolo potrebné zvýšiť ho z pôvodných 3,82 % až na 4,38 %, čo so sebou prinášalo ďalší problém. S tak vysokým obohatením dochádza na začiatku kampane k nadmernému prebytku reaktivity, čo má za následok nerovnomerne rozložený výkon v AZ. Riešením sa ukázalo byť palivo s vyhorievajúcimi absorbátormi, ktoré na začiatku kampane eliminuje tok neutrónov a tým klesá reaktivita. Ako absorbátor je použité gadolínium, z čoho plynul aj názov paliva Gd-1. Po palive Gd-1 sa začalo používať palivo Gd-2, ktoré malo paradoxne nižšie obohatenie ^{235}U . Tento fakt musel byť kompenzovaný, a to tak, že sa zlepšil vodo-uránový pomer (zvýšenie objemu vody v palivovom súbore o 2,7 %) a v prútku sa predĺžil stĺpec paliva o šesť centimetrov. Tieto zmeny sa ukázali oproti palivu Gd-1 ekonomickejšie a efektívna dĺžka kampane sa predĺžila z pôvodných 320 na 330 dní. Z tohto jednoduchého výpočtu vyplýva, že dĺžka pravidelnej krátkej odstávky bola zhruba 32 dní (po prirátaní 1 % celkovej dĺžky kampane na neočakávané poruchy, ktoré sa môžu vyskytnúť počas prevádzky, tzv. technická poruchovosť). Neskôr do debát o jadrovom palive zasiahla spoločnosť Škoda JS Plzeň, ktorá navrhla nové profilovanie paliva

Gd-2 a tým vzniklo palivo Gd-2+. V roku 2009 prišlo palivo Gd-2M, ktorým sa dosiahlo zvýšenie výkonu o 5 % a zároveň sa predĺžila doba kampane na 340 efektívnych dní. Toto palivo sa na elektrárni používa aj v dnešnej dobe, avšak elektráreň už pracuje na výkon 500 MW, čo predstavuje zvýšenie výkonu až na 113 % oproti projektovému riešeniu. Tento nárast bol dosiahnutý modernizáciou rôznych častí elektrárne, menovite, výmena nízkotlakých častí turbíny priniesla viac ako 3,6 % výkonu, výmena vysokotlakých častí turbíny viac ako dve percentá výkonu. Modernizáciou parovodov sa získali ďalšie dve percentá výkonu. Prípadné dodatočné zvyšovanie tepelného výkonu použitím paliva s vyšším stredným obohatením by zvyšovalo fluenciu neutrónov, čo by sa mohlo negatívne prejavovať na tlakovej nádobe reaktoru, čo je v dnešnej dobe, kedy elektráreň žiada o predĺženie licencie, nežiaduce [2].

5.1.3.1 Rozloženie kaziet v aktívnej zóne

V päť-ročnom palivovom cykle by počas každej plánovanej krátkej odstávky malo dochádzať k výmene približne 72 kaziet. Po jednoduchom výpočte však zistíme, že pri výmene v takomto objeme by za päť rokov došlo k výmene celkom až 360 kaziet, čo je viac ako celkový počet kaziet v aktívnej zóne (349). Dôvod tohto rozdielu je zakotvený vo fakte, že palivová časť regulačných súborov má stredné obohatenie ^{235}U stále len 3,82 % a to nie je dostatočne vysoké na udržanie kaziet v cykle po dobu 5 rokov. Päť-ročný palivový cyklus teda znamená, že v aktívnej zóne sú päť rokov pracovné kazety, nie však kazety regulačné. Toto vysvetlenie opäť nie je presné. Po dôkladnej analýze zistíme ďalšie drobné odchýlky, v podobe zlomkov, ktoré sú však dôsledkom faktu, že z času na čas sa do aktívnej zóny ukladajú už odpísané kazety a naopak je potrebné počítať so síce veľmi zriedkavými, ale predsa poruchami kaziet (porušenie hermetickosti kaziet), ktoré sa riešia ich výmenou za nové.

Ako najideálnejšia séria výmen sa ukázala schéma 60 + 12 (pracovné + regulačné) a 66 + 6, ktoré sa striedajú. Kazety sa ukladajú podľa ekonomicky výhodnejšej metóde *out-in* a to nasledujúcim spôsobom. Prvá skupina obsahuje kazety najstaršie a teda štvor-ročné. V druhej skupine prevažujú trojročné kazety ktoré sa ukladajú do stredu rady a po okrajoch sú kazety štvor-ročné. Tretia skupina obsahuje troj, dvoj a úplne čerstvé kazety. Tretia skupina je charakteristická tým, že obsahuje taktiež tri regulačné kazety. Štvrtá skupina má podobné zloženie ako tretia, s výnimkou žiadnych regulačných kaziet. V piatej skupine sú jedno, dvoj a trojročné kazety. V šiestej, jedno a dvojročné kazety, a sú tu tiež regulačné kazety. Dve trojročné, štvor-ročná a dve čerstvé kazety sú v siedmej skupine. V ôsmej skupine sú tri dvojročné a jedna trojročná kazeta, v deviatej je opäť jedna regulačná a dve ročné kazety. Desiatu skupinu obsahuje jednu trojročnú a jednu čerstvú kazetu, jedenásta skupina jednu trojročnú kazetu a posledná dvanásť skupina (centrálna) je vyhradená pre regulačný súbor. Obr 5-4 zobrazuje rozloženie kaziet v AZ [4].



Obr. 5-4: Rozmiestnenie kaziet v aktívnej zóne pre 5-ročný palivový cyklus, prevzaté z [28]

5.1.4 6 ročný palivový cyklus

Šesť-ročný palivový cyklus sa zatiaľ v Českej republike nepodaril presadiť a momentálne ani nie je v pláne. Na treťom bloku EDU, ktorý má momentálne najlepšie parametre sa niektoré kazety v AZ nechávajú aj šiestym rokom. Spoločnosť Škoda JS Plzeň navrhla palivo s obohatením 4,78 %, ktoré obsahuje vysokú profiláciu prútikov a bolo by schopné udržať cyklus po dobu šiestich rokov, avšak na túto voľbu sa nepristúpilo kvôli vysokej navrhovanej cene spoločnosti TVEL. Takéto palivo by taktiež potrebovalo vysoký obsah gadolína a s tým by bola spojená potreba kontajnerov CASTOR s hrubšími stenami, čo predstavuje ďalšie navýšenie nákladov. Na Slovensku sa od roku 2011 začalo v elektrárni Bohunice zaväzovať palivo druhej generácie s vyhorievajúcimi absorbátormi na báze gadolína so stredným obohatením 4,87 % ^{235}U . S týmto palivom by sa chceli priblížiť šesť ročným palivovým cyklom. V Českej republike nie sú snahy prikláňať sa k tomuto palivu aj preto, že návrh AZ by už bol príliš komplikovaný.

5.1.5 Špeciálne palivové cykly

Daneš Burket sa vo svojej dizertačnej práci pokúsil navrhnuť 18 mesačné kampane s palivom Gd-1 a ako regulačné kazety použil radiálne profilované kazety so stredným obohatením 3,82 % ^{235}U . V nasledujúcej stati sú opísané jeho návrhy. Burket navrhol celkom tri varianty 18 mesačných kampaní a označil ich 18A, 18B a 18C. Je pochopiteľné že na takýto prechod nie je z ekonomických hľadísk možné prejsť hneď, a preto každá varianta obsahuje hneď päť kampaní spojených s prechodom. Je nutné pripomenúť, že v praxi sa tieto cykly nikdy nepoužili, pretože sa s palivom použitom pri návrhu ukázali ako neekonomické [4].

5.1.5.1 Varianta 18A

- Schéma zaväzania 108 + 12; 108 + 12; 108 + 12
- Metóda *in-out*
- 465 efektívnych dní
- Maximálne vyhorenie 48 – 52 MWd/kg
- Stredné obohatenie ^{235}U 4,38 %
- Čerstvé palivové súbory sú zaväzované hlavne do tretej a štvrtej skupiny [4]

5.1.5.2 Varianta 18B

- Schéma zavážania 102 + 12; 114 + 12; 114 + 12; 114 + 12; 114 + 12
- Metóda *in-out*
- 475 efektívnych dní
- Maximálne vyhorenie 47 – 52 MWd/kg
- Stredné obohatenie ^{235}U 4,38 %
- Čerstvé kazety sa vkladajú opäť do tretej a štvrtej skupiny [4]

5.1.5.3 Varianta 18C

- Varianta sa vyznačuje striedaním 12 a 18 mesačných kampaní – kompenzuje sa nižší počet prekládok v AZ
- Schéma zavážania 102 + 12; 114 + 12; 78 + 12; 114 + 12; 78 + 12; 114 + 12 pričom 18 mesačné kampane majú 510 efektívnych dní a 12 mesačné kampane 330 efektívnych dní
- Metóda *in-out*
- Najlepšie maximálne vyhorenie až 54,28 MWd/kg
- Stredné obohatenie ^{235}U 4,38 %
- Pri 12 mesačných cykloch sa čerstvé palivové kazety zavážajú už do druhej skupiny, čo má za následok vyšší tok neutrónov na tlakovú nádobu a jej následné opotrebenie
- Pri 18 mesačných cykloch sa čerstvé kazety objavujú omnoho hlbšie v centre aktívnej zóny [4]

5.1.6 15 mesačné kampane

Ďalšou z možných variant palivových cyklov sa ukazuje maďarský koncept 15 mesačných kampaní. Tento návrh je vhodný pre reaktory VVER 440 a uvažuje sa o ňom na maďarskej elektrárni *Paks*, ktorá má rovnako ako EDU elektrický výkon 500 MW a štyri bloky. Kampane s dĺžkou 15 mesiacov by si vyžadovali zvýšenie stredného obohatenia paliva ^{235}U z aktuálnych 4,2 % na 4,7 – 4,8 % a tiež zvýšenie množstva gadolína v jednotlivých palivových súboroch (z pôvodných troch prútikov v kazete na šesť prútikov). Predpokladá sa, že každá kampaň by dosahovala 415 – 420 efektívnych dní. Nespornou výhodou tohto cyklu by bol stacionárny priebeh odstávok na jednotlivých reaktoroch, čo prináša „jednoduchosť“ z hľadiska organizácie prevádzky elektrárne. Každý rok by odstávky prebehli len na troch blokoch zo štyroch a nasledujúci rok by sa poradie zmenilo. Na reaktore na ktorom neprebehla výmena paliva v predchádzajúcom roku, by nasledovala odstávka ako prvá v ďalšom roku. Hneď za ním by nasledovala odstávka na bloku na ktorom prebehla odstávka ako prvá v predchádzajúcom roku. Pre lepšie pochopenie celý cyklus jednoducho zobrazuje *Tab. 5-1* [16].

Tab. 5-1 Plánované odstávky pri 15 mesačných kampaniach na elektrárni Paks [16]

Rok	2013				2014				2015			
Mesiac	Feb	Máj	Aug	Nov	Feb	Máj	Aug	Nov	Feb	Máj	Aug	Nov
Odstavený blok	1	4	2	3	-	1	4	2	3	-	1	4

Rok	2016				2017				2018			
Mesiac	Feb	Máj	Aug	Nov	Feb	Máj	Aug	Nov	Feb	Máj	Aug	Nov
Odstavený blok	2	3	-	1	4	2	3	-	1	4	2	3

5.2 Návrh možných prekládok paliva na EDU pri 12, 15 a 18 mesačných kampaniach

Táto stať rozoberá možné návrhy prekládok paliva pri pravidelných krátkych odstávkach blokov na EDU. Grafické zobrazenie predstavuje pohľad na jednotlivé termíny odstávok pre kampane v dĺžke 12 mesiacov, 15 mesiacov a 18 mesiacov. Jednotlivé bloky na EDU sú pre lepšiu prehľadnosť vysvietené farebne a to žltou pre blok EDU1, zelenou pre EDU2, modrou pre EDU3 a fialovou pre blok EDU4.

5.2.1 12 mesačné kampane – 5 ročný palivový cyklus

Tabuľka Tab. 5-2 zobrazuje momentálny stav na EDU. Kampane trvajú 12 mesiacov a palivový cyklus je 5-ročný. Táto varianta je veľmi výhodná, všetky prekládky nastávajú na jednotlivých blokoch prakticky v rovnakú dobu.

Tab. 5-2 Termíny odstávok na EDU pri 12 mesačných cykloch - momentálny stav

Rok	Mesiac											
	Január	Február	Marec	Apríl	Máj	Jún	Júl	August	September	Október	November	December
2013	EDU1			EDU2					EDU3		EDU4	
2014	EDU1			EDU2					EDU3		EDU4	
2015	EDU1			EDU2					EDU3		EDU4	
2016	EDU1			EDU2					EDU3		EDU4	
2017	EDU1			EDU2					EDU3		EDU4	
2018	EDU1			EDU2					EDU3		EDU4	

5.2.2 15 mesačné kampane – 5-ročný palivový cyklus

Tabuľka Tab. 5-3 zobrazuje možný návrh 15 mesačných kampaní a termínov ich prekládok pre EDU pri prechode z momentálneho nastaveného systému.

Tab. 5-3 Možné termíny odstávok na EDU pri 15 mesačných kampaniach

Rok	Mesiac											
	Január	Február	Marec	Apríl	Máj	Jún	Júl	August	September	Október	November	December
2013	EDU1			EDU2					EDU3		EDU4	
2014				EDU1			EDU2					EDU3
2015	EDU3		EDU4				EDU1				EDU2	
2016			EDU3		EDU4					EDU1		
2017		EDU2				EDU3		EDU4				
2018	EDU1			EDU2					EDU3		EDU4	

Tabuľka *Tab. 5-4* zobrazuje modifikovaný návrh 15 mesačných kampaní a termínov ich prekládok. Modifikácia spočíva v predpoklade, že odstávky na jednotlivých blokoch prebiehajú pravidelne každé tri mesiace, čo zabezpečí, že prekládky budú prebiehať vždy v rovnakom čase v roku. Na *Tab. 5-4* je viditeľný jasný rozdiel oproti predchádzajúcemu stavu (*Tab. 5-3*).

Tab. 5-4 Možné termíny odstávok na EDU pri 15 mesačných kampaniach - odstávky každé tri mesiace

Rok	Mesiac											
	Január	Február	Marec	Apríl	Máj	Jún	Júl	August	September	Október	November	December
2013		EDU1			EDU2			EDU3			EDU4	
2014					EDU1			EDU2			EDU3	
2015		EDU4						EDU1			EDU2	
2016		EDU3			EDU4						EDU1	
2017		EDU2			EDU3			EDU4				
2018		EDU1			EDU2			EDU3			EDU4	

5.2.3 18 mesačné kampane – 4,5-ročný cyklus

Tabuľka 5-5 ukazuje možné termíny prekládok pri 18 mesačných kampaniach. Pri predpoklade, že by odstávky na jednotlivých blokoch prebiehali v pravidelných intervaloch 3 mesiace, by odstávky prebiehali opäť vždy v rovnaký čas v roku.

Tab. 5-5 Možné termíny odstávok na EDU pre 18 mesačné kampane

Rok	Mesiac											
	Január	Február	Marec	Apríl	Máj	Jún	Júl	August	September	Október	November	December
2013		EDU1			EDU2			EDU3			EDU4	
2014								EDU1			EDU2	
2015		EDU3			EDU4							
2016		EDU1			EDU2			EDU3			EDU4	
2017								EDU1			EDU2	
2018		EDU3			EDU4							

6 CELKOVÉ ZHODNOTENIE VYUŽITEĽNOSTI PALIVA

Táto kapitola pojednáva o ekonomickej využiteľnosti paliva, ďalej o organizácii prevádzky a výhodách a nevýhodách skladovania paliva pri rôzne dlhých palivových cykloch, konkrétne troj-ročnom, štvor-ročnom a päť-ročnom palivovom cykle.

6.1 Ekonomické využitie paliva

Na ekonomiku jadrových elektrární a hlavne ich zisk majú najväčší vplyv práve dĺžky palivových cyklov a tiež dĺžky jednotlivých kampaní resp. počet efektívnych dní v jednotlivých kampaniach. V zásade platí, že čím je palivový cyklus dlhší, ekonomika elektrárne sa zvyšuje.

Hneď v úvode je však potrebné uviesť, že výsledky, ku ktorým sa dospelo v tejto stati sú ovplyvnené značnou systematickou chybou, ktorá vznikla počítaním pri veľmi zjednodušených podmienkach a predpokladoch.

6.1.1 Trojročný palivový cyklus

Pri výpočtoch pre troj-ročný palivový cyklus sa vychádza z nasledujúcich vopred známych predpokladov a to, že jedna kampaň má 300 efektívnych dní, aktívna zóna obsahuje 312 pracovných palivových kaziet so stredným obohatením 3,6 % ^{235}U a 37 regulačných kaziet so stredným obohatením 2,4 % ^{235}U . Každý palivový súbor obsahuje 126 palivových prútikov. Pracovná kazeta váži celkom 1087 g a regulačná 1041 g [28]. Tepelný výkon EDU bol pri trojročnom palivovom cykle 1375 MW, pričom sa dosahovalo elektrického výkonu 440 MW. Z týchto parametrov vieme ďalej podľa vzťahu (6.1) vypočítať celkovú hmotnosť uránu aktívnej zóny v pracovných kazetách:

$$m_{Up} = N_p \cdot N_w \cdot m_p = 312 \cdot 126 \cdot 1,087 \text{ kg} = \underline{\underline{42732,1 \text{ kg}}} \quad (\text{kg}; -; -; \text{kg}) \quad (6.1)$$

Hmotnosť uránu aktívnej zóny v regulačných kazetách podľa vzťahu (6.2):

$$m_{Ur} = N_r \cdot N_w \cdot m_r = 37 \cdot 126 \cdot 1,041 \text{ kg} = \underline{\underline{4853,1 \text{ kg}}} \quad (\text{kg}; -; -; \text{kg}) \quad (6.2)$$

Hmotnosť ^{235}U v pracovných kazetách podľa vzťahu (6.3):

$$m_{235Up} = k_{\%p} \cdot m_{Up} = 0,036 \cdot 42732,1 \text{ kg} = \underline{\underline{1538,4 \text{ kg}}} \quad (\text{kg}; -; -; \text{kg}) \quad (6.3)$$

Hmotnosť ^{235}U v regulačných kazetách podľa vzťahu (6.4):

$$m_{235Ur} = k_{\%r} \cdot m_{Ur} = 0,024 \cdot 4853,1 \text{ kg} = \underline{\underline{116,1 \text{ kg}}} \quad (\text{kg}; -; -; \text{kg}) \quad (6.4)$$

Pre energiu získanú štiepením jedného atómu ^{235}U je potrebné vypočítať hmotnostný schodok Δm . Postupuje sa podľa rovnice (6.5):

$$\begin{aligned} & {}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1n \rightarrow {}_{95}^{95}\text{Mo} + {}_{139}^{139}\text{La} + 2 \cdot {}_0^1n \\ & m({}_{92}^{235}\text{U}) + m({}_0^1n) = m({}_{95}^{95}\text{Mo}) + m({}_{139}^{139}\text{La}) + 2m({}_0^1n) - \Delta m \\ & \Delta m = 94,945 \text{ u} + 138,955 \text{ u} + 2 \cdot 1,00866 \text{ u} - 235,124 \text{ u} - 1,00866 \text{ u} = \quad (\text{kg}; \text{kg}; \text{kg}; \text{kg}; \text{kg}) \quad (6.5) \\ & = 0,215 \text{ u} = \underline{\underline{3,57 \cdot 10^{-28} \text{ kg}}} \end{aligned}$$

Energia získaná štiepením jedného atómu ^{235}U podľa vzťahu (6.6):

$$E_j = \Delta m \cdot c^2 = 3,57 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = \underline{\underline{3,213 \cdot 10^{-11} \text{ J}}} \quad (\text{J}; \text{kg}; \text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (6.6)$$

Prepočet energie na eV podľa vzťahu (6.7):

$$E_{jeV} = \frac{E_j}{e} = \frac{3,213 \cdot 10^{-11} \text{ J}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = \underline{\underline{200,5 \text{ MeV}}} \quad (\text{eV}; \text{J}; \text{C}) \quad (6.7)$$

Zo vzťahu (6.7) vyplýva že energia jedného atómu ^{235}U je teoreticky až 200,5 MeV, no my ďalej uvažujeme skutočne využiteľnú energiu len 190 MeV, čo je ekvivalent energie $3,03 \cdot 10^{-11} \text{ J}$.

Počet atómov v 1 kg ^{235}U podľa vzťahu (6.8):

$$N = \frac{N_A}{A} = \frac{6,022 \cdot 10^{26}}{235} = \underline{\underline{2,562 \cdot 10^{24}}} \quad (-; -; -) \quad (6.8)$$

Rozštiepením všetkých jadier sa uvoľní energia, ktorú dostaneme zo vzťahu (6.9):

$$e_{1kg} = N \cdot E_j = 2,562 \cdot 10^{24} \cdot 3,03 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 7,76 \cdot 10^{13} \text{ J} = \underline{\underline{900 \text{ MWd}}} \quad (\text{J}; \text{kg}^{-1}; \text{kg}^{-1}; \text{J}) \quad (6.9)$$

Teoreticky využiteľnú energiu (tepelný výkon) celej AZ ďalej počítame podľa vzťahu (6.10):

$$\begin{aligned} E_{rt} &= e_{1kg} \cdot (m_{235Up} + m_{235Ur}) = 7,76 \cdot 10^{13} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (1538,4 \text{ kg} + 116,1 \text{ kg}) = \\ &= \underline{\underline{1,284 \cdot 10^{17} \text{ J}}} = \underline{\underline{1489,1 \text{ GWd}}} \quad (\text{J}; \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}; \text{kg}) \quad (6.10) \end{aligned}$$

Pre výpočet reálnej dosiahnuteľnej energie je potrebné ďalej uvažovať účinnosť elektrárne, ktorú je možné vypočítať zo vstupných parametrov dosiahnutého tepelného a elektrického výkonu pri troj-ročných cykloch na EDU podľa vzťahu (6.11):

$$\eta_e = \frac{P_e}{P_t} \cdot 100 = \frac{440 \cdot 10^6 \text{ W}}{1375 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = \underline{\underline{32 \%}} \quad (-; \text{W}; \text{W}; -) \quad (6.11)$$

Reálne dosiahnuteľnú elektrickú energiu z celej AZ vypočítame podľa vzťahu (6.12):

$$E_{rr} = E_{rt} \cdot \eta_e = 1,284 \cdot 10^{17} \text{ J} \cdot 0,32 = 4,11 \cdot 10^{16} \text{ J} = \underline{\underline{476,5 \text{ GWd}}} \quad (\text{J}; \text{J}; -) \quad (6.12)$$

Skutočne vyrobená elektrická energia za jeden celý palivový cyklus (3 kampane) podľa vzťahu (6.13):

$$\begin{aligned} E_s &= 3 \cdot T_{ef} \cdot P_e = (3 \cdot 300 \cdot 24 \cdot 3600) \cdot \text{s} \cdot 440 \cdot 10^6 \text{ W} = 3,42 \cdot 10^{16} \text{ J} = \\ &= \underline{\underline{396,9 \text{ GWd}}} \quad (\text{J}; \text{s}; \text{W}) \quad (6.13) \end{aligned}$$

Z tohto výpočtu vyplýva, že nie všetky atómy sa využijú na reťazovú reakciu a po ukončení cyklu je palivo stále obohatené s uránom ^{235}U . Veľkosť obohatenia paliva v palivových kazetách po ukončení cyklu dostaneme zo vzťahu (6.14):

$$X_{p\%} = k_p \cdot \left(1 - \frac{E_s}{E_{rr}} \right) = 3,6 \% \cdot \left(1 - \frac{396,9 \cdot 10^9 \text{ J}}{476,5 \cdot 10^9 \text{ J}} \right) = \underline{\underline{0,60 \%}} \quad (\%; -; -; \text{J}; \text{J}) \quad (6.14)$$

Veľkosť obohatenia paliva v regulačných kazetách vypočítame zo vzťahu (6.15):

$$X_{r\%} = k_r \cdot \left(1 - \frac{E_s}{E_{rr}}\right) = 2,4\% \cdot \left(1 - \frac{396,9 \cdot 10^9 \text{ J}}{476,5 \cdot 10^9 \text{ J}}\right) = \underline{\underline{0,40\%}} \quad (\%;-;-;J;J) \quad (6.15)$$

6.1.2 Štvor-ročný palivový cyklus

Pri štvor-ročnom palivovom cykle predpokladáme 4 kampane pričom každá trvá 310 efektívnych dní. Pri analýze bolo použité palivo so stredným obohatením 3,82 % ^{235}U . Ďalej sa vychádza z predpokladov tepelného výkonu 1375 MW a elektrického výkonu 460 MW.

Hmotnosť ^{235}U v pracovných kazetách vypočítame podľa vzťahu (6.3):

$$m_{235Up} = 0,0382 \cdot 42732,1 \text{ kg} = \underline{\underline{1632,4 \text{ kg}}}$$

Hmotnosť ^{235}U v regulačných kazetách vypočítame podľa vzťahu (6.4):

$$m_{235Ur} = 0,0382 \cdot 4838,1 \text{ kg} = \underline{\underline{184,8 \text{ kg}}}$$

Teoreticky využiteľnú energiu celej AZ ďalej počítame podľa vzťahu (6.10):

$$E_{rt} = 7,76 \cdot 10^{13} \text{ J} \cdot (1632,4 \text{ kg} + 184,8 \text{ kg}) = 1,41 \cdot 10^{17} \text{ J} = \underline{\underline{1635,5 \text{ GWd}}}$$

Pre výpočet reálne dosiahnuteľnej elektrickej energie je potrebné ďalej uvažovať účinnosť elektrárne, ktorú je možné vypočítať zo vstupných parametrov dosiahnutého tepelného a elektrického výkonu pri štvor-ročných cykloch na EDU a vypočítame ju podľa vzťahu (6.11):

$$\eta_e = \frac{460 \cdot 10^6 \text{ W}}{1375 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = \underline{\underline{33,5\%}}$$

Reálne dosiahnuteľnú elektrickú energiu z celej aktívnej zóny vypočítame podľa vzťahu (6.12):

$$E_{rr} = 1,41 \cdot 10^{17} \text{ J} \cdot 0,335 = 4,724 \text{ J} = \underline{\underline{547,9 \text{ GWd}}}$$

Skutočne vyrobená energia za jeden celý palivový cyklus (4 kampane) vypočítame podľa vzťahu (6.13):

$$E_s = (4 \cdot 310 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s} \cdot 460 \cdot 10^6 \text{ W} = 4,93 \cdot 10^{16} \text{ J} = \underline{\underline{570,4 \text{ GWd}}}$$

Z tejto celkovej bilancie zdanlivo vyplýva, že skutočne vyrobená elektrická energia prevyšuje teoreticky dosiahnuteľnú energiu paliva, čo samozrejme nie je možné. Štvor-ročný palivový cyklus je už oproti trojročnému cyklu dostatočne dlhý na to aby sa v reaktore naplodilo postačujúce množstvo plutónia ^{241}Pu a ^{239}Pu (cca 0,8 %), ktoré je podobne ako ^{235}U veľmi dobre štiepateľné a teda aj použiteľné v jadrových reaktoroch. Stredné obohatenie ^{235}U či už palivových alebo regulačných kaziet teda vychádza záporné. Vypočítame ho podľa vzťahu (6.16):

$$X_{pr\%} = k_p \cdot \left(1 - \frac{E_s}{E_{rr}}\right) = 3,82\% \cdot \left(1 - \frac{570,4 \cdot 10^9 \text{ J}}{547,9 \cdot 10^9 \text{ J}}\right) = \underline{\underline{-0,157\%}} \quad (\%;\%;-;-;J;J) \quad (6.16)$$

6.1.3 Päť-ročný palivový cyklus

Podobnou analógiou je možno postupovať aj pri päť ročnom palivovom cykle. Uvažuje sa 5 kampaní každá v dĺžke 315 efektívnych dní. Ďalej bolo pri analýze použité palivo pre pracovné kazety Gd-2M so stredným obohatením 4,38 % a regulačné súbory s obohatením 4,25 % ^{235}U . Taktiež je nutný predpoklad o 6 cm vyššieho palivového stĺpca, čo prináša do aktívnej zóny viac ^{235}U . Tepelný výkon elektrárne je 1444 MW a elektrický výkon 500 MW.

Výpočet hmotnosti uránu v pracovných kazetách s predĺženým stĺpcom paliva je počítaný na základe pomerov výšok palivových stĺpcov (kapitola 2) podľa vzťahu (6.17):

$$m_{Up+6} = \frac{l_{p+6}}{l_p} \cdot m_{Up} = \frac{2,480 \text{ m}}{2,420 \text{ m}} \cdot 42732,1 \text{ kg} = \underline{\underline{43791,6 \text{ kg}}} \quad (\text{kg;m;m;kg}) \quad (6.17)$$

Hmotnosť uránu v regulačných kazetách s predĺženým stĺpcom paliva počítame analogicky podľa vzťahu (6.18):

$$m_{Ur+6} = \frac{l_{r+6}}{l_r} \cdot m_{Ur} = \frac{2,380 \text{ m}}{2,320 \text{ m}} \cdot 4838,1 \text{ kg} = \underline{\underline{4963,2 \text{ kg}}} \quad (\text{kg;m;m;kg}) \quad (6.18)$$

Hmotnosť ^{235}U v pracovných kazetách vypočítame podľa vzťahu (6.3):

$$m_{235Up} = 0,0438 \cdot 43791,6 \text{ kg} = \underline{\underline{1918,1 \text{ kg}}}$$

Hmotnosť ^{235}U v regulačných kazetách vypočítame podľa vzťahu (6.4):

$$m_{235Ur} = 0,0425 \cdot 4963,2 \text{ kg} = \underline{\underline{211 \text{ kg}}}$$

Pri 5-ročných cykloch je potrebné ďalej uvažovať len 4-ročný cyklus regulačných kaziet, čo v konečnom dôsledku prináša o 25 % viac paliva za celý palivový cyklus. Množstvo ^{235}U v regulačných kazetách sa tak navýši a vypočítame ho podľa vzťahu (6.19):

$$m_{235Ur} = k_{\%r} \cdot m_{Ur} \cdot 1,25 = 0,0425 \cdot 4963,2 \text{ kg} \cdot 1,25 = \underline{\underline{263,8 \text{ kg}}} \quad (\text{kg;-;kg;-}) \quad (6.19)$$

Teoreticky využiteľnú energiu celej AZ ďalej počítame podľa vzťahu (6.10):

$$\begin{aligned} E_{rt} &= e_{1kg} \cdot (m_{235Up} + m_{235Ur}) = 7,76 \cdot 10^{13} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (1918,1 \text{ kg} + 263,8 \text{ kg}) = \\ &= 1,693 \cdot 10^{17} \text{ J} = \underline{\underline{1963,7 \text{ GWd}}} \end{aligned}$$

Pre výpočet elektrického výkonu je potrebné ďalej uvažovať účinnosť elektrárne, ktorú je možné vypočítat' zo vstupných parametrov dosiahnutého tepelného a elektrického výkonu pri päť-ročných cykloch na EDU. Vypočítame ju podľa vzťahu (6.11):

$$\eta_e = \frac{500 \cdot 10^6 \text{ W}}{1444 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = \underline{\underline{34,6 \%}}$$

Reálne dosiahnutelnú elektrickú energiu z celej AZ vypočítame podľa vzťahu (6.12):

$$E_{rr} = 1,693 \cdot 10^{17} \text{ J} \cdot 0,346 = 5,858 \cdot 10^{16} \text{ J} = \underline{\underline{680 \text{ GWd}}}$$

Skutočne vyrobenú energiu za jeden celý palivový cyklus (5 kampaní) vypočítame podľa vzťahu (6.13):

$$E_s = (5 \cdot 315 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s} \cdot 500 \cdot 10^6 \text{ W} = 6,804 \cdot 10^{16} \text{ J} = \underline{\underline{787,5 \text{ GWd}}}$$

Pri päť-ročných cykloch sa v reaktoroch naplodí plutónia ^{241}Pu a ^{239}Pu ešte viac (cca 1 %) a stredné obohatenie ^{235}U či už palivových alebo regulačných kaziet po skončení cyklu vychádza teoreticky opäť záporné. Vypočítame ho podľa vzťahu (6.14) a (6.15):

$$X_{p\%} = 4,38 \% \cdot \left(1 - \frac{787,5 \cdot 10^9 \text{ J}}{680 \cdot 10^9 \text{ J}} \right) = \underline{\underline{-0,692 \%}}$$

$$X_{r\%} = 4,25 \% \cdot \left(1 - \frac{787,5 \cdot 10^9 \text{ J}}{680 \cdot 10^9 \text{ J}} \right) = \underline{\underline{-0,672 \%}}$$

6.1.4 Zhodnotenie jednotlivých palivových cyklov

Pri troj-ročných cykloch sa na EDU dosahovala účinnosť elektrárne 32 % pričom potenciál paliva bol využitý na 83,2 %. Z jedného kilogramu ^{235}U sa dokázalo vyrobiť 239,6 MWd elektrickej energie. Oproti tomu pri štvor-ročných cykloch sa na EDU zvýšil potenciál využiteľnosti paliva až na 104,1 % a to vďaka naplodenému plutóniu, ktoré má dobré štiepateľné vlastnosti. Z jedného kilogramu ^{235}U sa vyrobilo 313,9 MWd elektrickej energie a relatívne zvýšenie využiteľnosti jadrového paliva sa zvýšilo o 31,1 % oproti projektovému riešeniu. Pri päť-ročných cykloch, ktoré sa ukázali ako najefektívnejšie spomedzi všetkých je potenciál paliva využívaný až na 115,8 %, pričom elektrická energia z jedného kilogramu ^{235}U je až 360,9 MWd. Relatívna využiteľnosť paliva sa oproti projektovému riešeniu zvýšila o 54,4 %. K tomuto výsledku prispieva taktiež vyššia účinnosť elektrárne pri tomto cykle $\eta = 0,346$ a možnosť využitia naplodeného plutónia ako ďalšieho paliva. Lepší prehľad vo výsledku poskytuje Tab. 6-1.

Tab. 6-1 Porovnanie jednotlivých cyklov z hľadiska využitia paliva

Cyklus	η_e	Využitie potenciálu paliva [%]	$E_{U1\text{kg}}$ [MWd]	Relatívne zvýšenie využiteľnosti paliva [%]
3-ročný	0,32	83,2	239,6	100
4-ročný	0,335	104,1	313,9	131,1
5-ročný	0,346	115,8	360,9	150,6

7 ZÁVER

Z doterajšej prevádzky EDU, a jej ekonomických výsledkov vyplýva, že palivový cyklus je tu nastavený veľmi dobre. Od začiatku prevádzky v roku 1985 palivový cyklus EDU prešiel veľmi progresívnym vývojom, ktorý jej zabezpečil prvenstvo na poli energetických zdrojov v Českej republike, či už v oblasti bezpečnosti, alebo cien výroby elektrickej energie. Vývoj spočíval hlavne v predlžovaní palivového cyklu a to z projektových troch rokov na súčasných päť. Vyžadoval si však aj modernizáciu použitého paliva, predovšetkým zvýšenie stredného obohatenia uránom ^{235}U , použitie vyhorievajúcich absorbátorov na báze gadolína, ako aj inovácie v konštrukcii a použitých materiáloch. V neposlednom rade prebehla aj inovácia zariadení sekundárnej časti, ktorá mimo iné zvýšila účinnosť elektrárne.

Do budúca sú načrtnuté možné 15 mesačné kampane, ktoré by ešte zefektívniili momentálny stav na elektrárni. V práci som sa tiež pokúsil navrhnuť simuláciu prekládok týchto kampaní. Vyžadovali by si však určitú synchronizáciu s ETE, ktorá v súčasnej dobe nie je možná. O šesť ročných palivových cykloch sa v blízkej dobe neuvažuje. Dôvodom je hlavne palivo, ktoré by sťažilo návrh AZ a navyše je finančne veľmi náročné.

Ako už bolo naznačené, z ekonomického hľadiska sa najviac osvedčili päť-ročné palivové cykly. Oproti projektovým cyklom, predstavujú úsporu paliva viac ako 50 %. Výpočet, ktorý bol prevedený v tejto práci je zaťažený značnou systematickou chybou, kvôli zjednodušeným podmienkam. Napriek tomu sú zjavné veľké úspory pri prevádzkovaní dlhších palivových cyklov.

Keďže jadrová elektráreň je veľmi zložitým technologickým zariadením, bez presne naplánovanej organizácie jej prevádzky by mohla predstavovať veľké nebezpečenstvo pre životné prostredie a ľudstvo všeobecne. Na organizáciu prevádzky elektrárne sa preto kladie veľmi veľký dôraz. Na reaktoroch VVER 440 s ktorými operuje aj EDU podlieha väčšina zariadení technickým prehliadkam, ktoré musia byť vykonávané spravidla každých 15 mesiacov. Dĺžka kampaní je preto veľmi závislá aj na tomto fakte, ktorý vymedzuje legislatíva. Pre dlhšie než 12 mesačné kampane (so zachovaním určitej časovej rezervy, ktorá je momentálne 3 mesiace) by bolo nutné tieto zariadenia prelicencovať na dlhšie intervaly technických prehliadok. Toto by predstavovalo obrovskú finančnú záťaž a preto je potreba dobre zvážiť, či by bol taký krok stále výhodný. Napríklad pri 18 mesačných kampaniach by sa na elektrárni behom troch rokov vykonali miesto pôvodných 3 odstávok už len dve a tak by sa ušetrilo približne 25 dní, kedy by mohla ísť elektráreň na plný výkon. Aby bola takáto zmena výhodná, musel by zisk z vyrobenej elektrickej energie za týchto 25 dní pokryť všetky náklady spojené s prelicencovaním zariadení a celkovou zmenou prevádzky elektrárne.

Druhým dôležitým faktorom je synchronizácia prevádzky viacerých jadrových elektrární. V prostredí Českej republiky sa jedná konkrétne o EDU a ETE. Ako bolo povedané už skôr, údržbu a technické prehliadky jadrových zariadení má na starosti len limitovaný počet firiem, ktoré majú vopred zazmluvnené operácie na jednotlivých blokoch. Určité operácie vykonávané počas odstávky môžu vykonávať len skupiny ľudí na to oprávnené (napríklad otváranie reaktorovej nádoby má na starosti len firma ŠKODA JS Plzeň). Posunutie pravidelnej odstávky na blokoch EDU (či už o tri alebo šesť mesiacov) by mohlo viesť ku kolízii termínov s odstavkami na ETE.

Hodnotenie jednotlivých palivových cyklov z hľadiska skladovania paliva sa zameriava hlavne na objem vyprodukovaného jadrového paliva pri rôzne dlhých cykloch. Platí

tu jednoduchá úvaha, a to, že čím je palivový cyklus kratší, tým sa vyprodukuje viac vyhoreného paliva (stúpa jeho spotreba). Z tejto úvahy by ďalej vyplývalo, že najefektívnejšie je teda udržiavať čo najdlhšie palivové cykly. Nie je to však celkom pravda, pretože pri dlhých palivových cykloch sa naopak stretávame s problémami, ktoré nenastávajú pri cykloch kratších.

Výhody dlhších cyklov teda spočívajú v menšom objeme vyprodukovaného vyhoreného paliva s čím sú ďalej spojené nižšie náklady na kontajnery CASTOR a v konečnom dôsledku aj miesto v samotnom medzisklade vyhoreného paliva a tiež miesto v bazénoch vyhoreného paliva. Pri dlhších cykloch sa vymieňa menší počet čerstvých kaziet, čo zároveň skracuje pravidelné odstávky. Tieto doby predstavujú rádovo len hodiny, avšak každá hodina kedy reaktor „stojí“ a nevyrába sa elektrická energia prichádza spoločnosť, ktorá ho prevádzkuje rádovo o milióny korún zisku, preto tu existuje snaha o maximalizáciu doby, kedy reaktor vyrába elektrickú energiu, resp. predlžovanie kampaní.

S dlhými palivovými cyklami však zároveň prichádzajú vyššie požiadavky na stredné obohatenie paliva uránom ^{235}U a taktiež jeho náročnejšie profilovanie a použitie vyhorievajúcich absorbátorov. K tomuto faktoru sa ďalej viaže náročnejšie licencovanie paliva a nutnosť použitia vyspelejšieho výpočtového softvéru na návrh AZ. V palive tiež dochádza k väčšiemu vyhoreniu a palivo je teda viac rádioaktívne a teda aj nebezpečnejšie. Pri jeho skladovaní sa musia používať kontajnery CASTOR s hrubšími stenami, čo zas navyšuje náklady.

Keďže súčasné technológie pri výrobe energie z obnoviteľných zdrojov nie sú dostatočne vyvinuté na to, aby pokryli dopyt po elektrickej energii je možné tvrdiť, že energia z jadra je v súčasnosti nenahraditeľná. Zmenšujúce sa zásoby fosílnych palív toto tvrdenie len podkladajú. Bolo by veľmi chybné zastavovať rozvoj jadrovej energetiky, ktorá ľudstvu prináša čistú energiu, bez emisií.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] *Atómové elektrárne Mochovce* [online]. 2010 [cit. 2011-12-12]. Seas.sk. Dostupné z WWW: <http://www.seas.sk/_img/SEAS/SE%20Documents/Publik%C3%A1cie/Brozury_zavodov/SEan dEnel_EMOfacts_SK.pdf>.
- [2] BAJGL, Josef. ČEZ. Zvyšovanie elektrického výkonu. 2009.
- [3] BEČVÁŘ, Josef. Jaderné elektrárny. 2. dopl. vyd. Nakladatelství technické literatury: Praha, 1981, s. 19-21.
- [4] BURKET, Daneš. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany* [online]. Dukovany, 2003, 10.5.2012 [cit. 2012-05-19]. Dostupné z: <http://danes.burket.cz/files/burketdp.pdf>. Dizertačná práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Matějka, CSc.
- [5] BURKET, Daneš. *Pslib.cz* [online]. 2006-04 [cit. 2011-12-12]. Zkušenosti s palivem s vyhořívajícími absorbátory v jaderné elektrárně Dukovany. Dostupné z WWW: <http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/elektrarny/jaderne/palivo_dukovany.pdf>.
- [6] Castory: Castor 440/84. CEEI [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.ceei.sk/cz/castor-440-84.php>
- [7] Číňané údajně vyvinuli zcela novou technologii zpracování jaderného paliva [online]. 2009-01-06 [cit. 2011-12-12]. Atominfo.cz. Dostupné z WWW: <<http://atominfo.cz/2011/01/cinane-udajne-vyvinuli-zcela-novou-technologie-zpracovani-jaderneho-paliva/>>.
- [8] *Dobývání uranu* [online]. 2008-10-03 [cit. 2011-12-12]. Rusnuclear.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.rusnuclear.cz/vyvoz-jadernych-nejadernych-vyrodku/dobvyvani-uranu.html>>.
- [9] DUDA, Vitezoslav. *International Technical Conference on Practical Aspects of Deep Radioactive Waste Disposal* [online]. 2011 [cit. 2011-12-12]. Esdred.info. Dostupné z WWW: <<http://www.esdred.info/conference/reports/01-Viteslav-Duda.pdf>>.
- [10] *Energetický slovník : Vitřifikácia* [online]. 2008 [cit. 2011-12-12]. Javys.sk. Dostupné z WWW: <<http://www.javys.sk/sk/index.php?page=energeticky-slovník/V/3391>>.
- [11] HAŠEK, Miroslav. *Doprava a skladování vyhořelého jaderného paliva*. Pardubice, 2001. 29 s. Semestrální práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [12] *Hlubinné úložiště jaderného odpadu a jeho anatomie* [online]. 2007 [cit. 2011-12-12]. Jaderny-odpad.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.jaderny-odpad.cz/hlubinne-uloziste.htm>>.
- [13] *How is Uranium Mined and Processed?* [online]. 2011, 2011-10-02 [cit. 2011-12-12]. Keeptheban.org. Dostupné z WWW: <http://keeptheban.org/?page_id=744>.
- [14] *Konečná likvidace* [online]. 2010 [cit. 2011-12-12]. Energyweb.cz. Dostupné z WWW: <http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.4.5>.
- [15] *Mezisklad vyhořelého paliva Dukovany* [online]. 2008 [cit. 2011-12-12]. Sujb.cz. Dostupné z WWW: <http://www.sujb.cz/?c_id=483>.
- [16] NEMES, Imre. *15m CYCLE OPTION FOR NPP PAKS OPERATION*. Paks, 2011.
- [17] *O korporaci TVEL* [online]. 2008-10-03 [cit. 2011-12-12]. Rusnuclear.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.rusnuclear.cz/ruske-jaderne-palivo/tvel.html>>.

- [18] OTČENÁŠEK, Petr. Odpady z palivového cyklu jaderných elektráren: Zdokonalování technologií, zpřísnování dozoru a osvěta. Vesmír [online]. 2005 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanek/odpady-z-palivoveho-cyklu-jadernych-elektraren>
- [19] Palivový cyklus. VUJE Trnava [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.vuje.sk/sk/index.php?page=schemy/palivovy-cyklus>
- [20] Pichblende [online]. 2006 [cit. 2011-12-12]. Cs.wikipedia.org. Dostupné z WWW: http://keeptheban.org/?page_id=744.
- [21] *Prepracovanie paliva* [online]. 2008, posledná zmena 11.11.2011 [cit. 2011-12-12]. Javys.sk. Dostupné z WWW: <http://www.javys.sk/sk/index.php?page=nakladanie-s-vjp/konecne-riesenie/prepracovanie-paliva>.
- [22] *Processing of Used Nuclear Fuel* [online]. 2011-11-07 [cit. 2011-12-12]. World-nuclear.org. Dostupné z WWW: <http://www.world-nuclear.org/info/inf69.html>.
- [23] RIZMAN, Juraj. *Urán : Riziká ťažby a spracovania uránu v Slovenskej republike* [online]. 2009-08-01 [cit. 2011-12-12]. Nasepodjestedi.cz. Dostupné z WWW: <http://www.nasepodjestedi.cz/brozury/brozura%20SK.pdf>.
- [24] ŠKODA, Radek. Reakory VVER 440 – prednáška 2011-12-05
- [25] *Typy jaderných reaktorů* [online]. 2010 [cit. 2011-12-12]. Jaderna-energie.cz. Dostupné z WWW: <http://www.jaderna-energie.cz/jaderny-reaktor-typy.htm>.
- [26] *Typy reaktorů* [online]. c2009 [cit. 2011-12-12]. Proatom.luksoft.cz. Dostupné z WWW: <http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/typyreaktoru/>.
- [27] *Ťažkovodné reaktory typu CANDU* [online]. 2005 [cit. 2011-12-12]. Nuc.elf.stuba.sk. Dostupné z WWW: <http://www.nuc.elf.stuba.sk/lit/PimProjJR/pages/candu.htm>.
- [28] VYTISKA, Tomáš. *Seznámení s programem MOBY-DICK a výpočet benchmarku s palivem GD-2 (EDU)*. Praha, 2007. 65 s. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra jaderných reaktorů.
- [29] *Zadná časť palivového cyklu* [online]. 2010 [cit. 2011-12-12]. Seas.sk. Dostupné z WWW: <http://www.seas.sk/sk/spolocnost/o-nas/slovenske-elektrarne/jadrova-bezpecnost/zadna-cast-palivoveho-cyklu>.